ENDEAVOUR

Revista trimestral, publicada en cinco idiomas, destinada a registrar el progreso de las ciencias al servicio de la humanidad

---

VOLUMEN XX Octubre 1961 NUMERO 80

SUMARIO

061.22(100):5
Editorial: Un consejo internacional de las ciencias 175

547.473.2:577.15
La química orgánica y biológica del ácido mevalónico — A. F. WAGNER y K. FOLKERS — 177

550.311:551.241
El proyecto Mohole — SIR EDWARD BULLARD — 188

612.843.3:535.7
Los cuantos de luz y la visión — M. H. PIRENNE — 197

92:552.3
Sir James Hall (1761–1832) — V. A. EYLES — 210

581.524.441:553.97:551.345
Los terrenos turbosos boreales — H. SJÖRS — 217

539.124
El positronio — F. F. HEYMANN — 225

049.3
Revista de libros 232

Revistas resumidas de libros 235

Notas sobre los colaboradores 236

Libros recibidos .. ..Cubierta III

Redactor-jefe: TREVOR I. WILLIAMS
Redactores auxiliares: G. N. J. BECK (*Ediciones extranjeras*)
W. A. OSMAN

Imperial Chemical Industries Limited, Millbank, Londres, S.W.1
Toda comunicación a los editores debe dirigirse a North Block, Thames House, Millbank, Londres, S.W.1

Un consejo internacional de las ciencias

Desde siempre se ha afirmado que la ciencia no reconoce fronteras y que el libre intercambio de ideas entre los científicos de los diversos países es factor de primordial importancia. En el pasado, tal libertad superaba las más extremadas antipatías nacionales y aun la guerra misma. Hoy ya no es posible intercambio tan libre, pero se sigue reconociendo la validez del principio. Hoy no hay campo importante de la ciencia en el que no se realicen investigaciones en distintos países; los nuevos conocimientos y las nuevas nociones se intercambian amplia y rápidamente, para beneficio de todos, por medio de las revistas científicas, las reuniones de investigadores o la comunicación particular entre los individuos. Tales métodos satisfacen nuestras necesidades esenciales, por lo que muchos se opondrían al establecimiento de una más rígida organización; en la ciencia, como en toda otra empresa humana, se pierde mucho cuando se sacrifica el matiz personal. Sin embargo, existen numerosos ejemplos de cooperación internacional en los que es no ya deseable sino esencial una más clara definición de la distribución de funciones.

La novena Asamblea General del Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC) celebrada en Londres en septiembre pasado sirvió de oportuna indicación de la grande y creciente importancia de la organización administrativa necesaria para una efectiva colaboración internacional en ciertos tipos de proyectos científicos. El Año Geofísico Internacional (AGI), organizado por un comité especial del CIUC, ha sido, con mucho, el esquema de cooperación científica internacional de mayor envergadura hasta hoy realizado. Tomaron parte en él 67 países y se establecieron más de 2000 estaciones de observación, 57 de las cuales situadas en el Antártico. Aunque un proyecto científico de tal magnitud sólo puede realizarse de cuando en cuando, sirve como poderosa indicación de lo que puede conseguirse mediante un esfuerzo internacional.

Tiene además importancia en otro sentido el Año Geofísico Internacional en relación con el CIUC: ha servido de patente demostración de que éste es capaz de poner en movimiento una empresa de real envergadura. Debe servir, por consiguiente, para inspirar la confianza necesaria para que se le otorgue suficiente ayuda para una nueva expansión de sus actividades. Tal expansión parece muy necesaria ya que, desde la última guerra, se ha producido un desarrollo inmenso en casi todas las ramas de la ciencia, acompañado de la creciente cooperación interdisciplinaria e internacional. El CIUC no tiene como función reunir fondos y distribuirlos para la investigación; su objetivo es coordinar las actividades de otras organizaciones en un esquema general.

El CIUC ha adquirido su gran importancia actual partiendo de comienzos muy modestos, que se remontan a la segunda mitad del siglo XIX, cuando existían varias organizaciones en campos especializados de la ciencia. Algunas tenían carácter intergubernamental, otras habían recibido su impulso inicial en Alemania; en 1900 todas se reunieron bajo el título de Asociación Internacional de Academias. En ella era muy poderosa la influencia alemana; en realidad, la Asociación estaba dominada por las academias de Berlín, Gottinga, Heidelberg, Leipzig, Munich y Viena. La primera guerra mundial paralizó casi enteramente sus actividades; luego se fundó el Consejo Internacional de Investigaciones por iniciativa conjunta de la *Académie des Sciences* de París, la *Royal Society* de Londres y la *National Academy of Sciences* de Wáshington. Este Consejo servía como coordinador de las diversas uniones científicas, que incluían la química, las ciencias biológicas y la física: pero originalmente no era más internacional que la antigua Asociación de Academias, ya que estaba limitado a los países aliados. En 1931 el Consejo se reconstituyó para formar el Consejo Internacional de Uniones Científicas, con una constitución y fines más apropiados a su título; sus objetivos se habían definido como la coordinación de las actividades de las organizaciones nacionales afiliadas y de las varias uniones internacionales. Cada una de éstas tenía completa autonomía.

De nuevo la guerra interrumpió esta cooperación, pero poco después el Consejo volvió a reconstituirse. En la actualidad tiene un doble objetivo: primero, coordinar y facilitar las actividades de las uniones; segundo, servir de centro de coordinación de las organizaciones nacionales a él afiliadas. Estas uniones se dividen hoy en dos clases: generales y especializadas; tienen distinta representación y sus votos se computan de manera diferente. Las generales incluyen la astronomía, geodesia y geofísica, química pura y aplicada, y ciencias biológicas. Entre las especializadas se encuentran las de radiociencia, cristalografía,

ciencias fisiológicas, bioquímica, e historia y filosofía de la ciencia.

Mientras se estaba reconstituyendo el CIUC se formó un nuevo organismo internacional dedicado también a la esfera científica: la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco). Hay fundamentales diferencias entre ambas entidades. La Unesco es un organismo intergubernamental cuyos miembros son los Estados. El CIUC es una asociación de academias científicas o de consejos de investigación nacionales, por un lado, y de las uniones científicas internacionales, por otro. Sin embargo, como es natural, los intereses de ambas entidades se superponen en ciertos aspectos, y para evitar inútiles duplicaciones de esfuerzos se definieron en 1946, en un convenio renovado posteriormente cada año, las respectivas esferas de actividad. La Unesco facilita al CIUC una subvención anual y está representada en las reuniones del Consejo Ejecutivo y de la Asamblea General. Por su parte, el CIUC ofrece a la Unesco asesoramiento en aquellas cuestiones científicas en que ésta lo necesite.

Las actuales actividades del CIUC son demasiado extensas para que podamos aquí dar más que un resumen de algunas características importantes. En un artículo recientemente publicado en ENDEAVOUR (**18**, 88, 1959), Sir Harold Spencer Jones, Exsecretario del Consejo ha dado una descripción detallada. Aparte de organizar extensos proyectos internacionales para realizar observaciones y experimentos, el CIUC lleva a cabo importante labor como coordinador en la función de la preparación de resúmenes analíticos y mantiene un sistema de lo que se denominan «servicios permanentes». El CIUC comenzó a interesarse en tales actividades en 1949, año en que la Unesco organizó en París una conferencia sobre tal tema. En el mismo año, el CIUC, como consecuencia de su Asamblea General celebrada en Copenhague, nombró una comisión conjunta para la preparación de resúmenes analíticos en las ciencias físicas, comisión que en 1950 quedó encargada por la Unesco de tal función. En 1951, la Junta de Resúmenes Analíticos del CIUC quedó establecida y en la actualidad colabora con *Physics Abstracts*, *Bulletin Signalétique*, *Physikalische Berichte* y el Instituto de Información Científica de Moscú; su principio directriz es que en un idioma dado debe existir sólo una revista de resúmenes analíticos para cada rama determinada de la ciencia. Posteriormente su competencia se extendió al campo de la química y en la actualidad la Junta de Resúmenes Analíticos coordina las labores de las principales revistas de resúmenes analíticos en el campo de la química en alemán, francés, inglés y ruso.

La Federación de Servicios Astronómicos y Geofísicos se estableció en 1956. En la actualidad comprende nueve de dichos servicios y ayuda a las uniones de astronomía, geodesia y geofísica, y radiociencia. Dichos servicios incluyen una oficina internacional de la hora, una oficina de gravimetría, un servicio de mareas terrestres y un servicio central de ursigramas para la transmisión de datos codificados ionosféricos, solares geomagnéticos y geofísicos.

Además el CIUC cuenta con cuatro comités especiales que tratan respectivamente de geofísica, investigaciones oceanográficas, investigaciones antárticas e investigaciones interplanetarias. En la actualidad, la tarea más importante del comité de geofísica es asegurar la explotación más amplia posible de los resultados del AGI, pero además está ya preparando planes para otros proyectos comparables. Entre ellos se incluye un estudio magnético mundial — proyectado para 1964–66, cuando la actividad solar alcanzará un mínimo — y una exploración del manto de la Tierra. Entre los proyectos del comité especial de investigaciones oceánicas hay uno que consiste en un detallado estudio del Oceano Indico en 1962–63. El interés especial del comité de investigaciones interplanetarias, establecido en 1958, se orienta más bien hacia los estudios teóricos que hacia los problemas tecnológicos que plantean la construcción y lanzamiento de satélites y proyectiles.

El efectivo cumplimiento de todas esas tareas requiere una complicada organización y los fondos necesarios para mantenerla. Hasta ahora los ingresos totales se han visto limitados a 115 000 libras esterlinas (320 000 dólares) y si se ha podido conseguir tanto con tan pocos fondos ello se ha debido a que la mayoría de las colaboraciones han sido ofrecidas gratuitamente — y a que el directorio central permanente, que reside en La Haya, es muy pequeño. Sin embargo, es evidente que se ha llegado a un punto en que las tareas de organización a que debe hacer frente el CIUC son demasiado importantes para los medios y finanzas de que dispone tal entidad. En un momento en que las inversiones internacionales en la investigación se cuentan en millones de libras anualmente es de esperar que el CIUC no tendrá dificultades en conseguir las sumas relativamente modestas que necesita para mantener y extender sus servicios.

La química orgánica y biológica del ácido mevalónico

A. F. WAGNER y K. FOLKERS

Desde su identificación en 1956, el ácido mevalónico ha sido reconocido como una sustancia clave en la síntesis biológica de una gran variedad de productos naturales muy importantes, incluyendo esteroides, carotenoides y terpenos. Su descubrimiento tiene pues la máxima importancia científica. Este artículo, escrito por pioneros en este campo, revisa la investigación que condujo al reconocimiento del ácido mevalónico como un factor de crecimiento, su aislamiento, la identificación de su estructura y configuración, su síntesis y la aclaración de su función en una variedad de procesos biosintéticos.

DESCUBRIMIENTO Y AISLAMIENTO

Muchos investigadores han utilizado materiales tales como soluciones de residuos secos de destilaciones alcohólicas solubles para estudiar factores que promueven el crecimiento de los animales. A. F. Novak, S. M. Hauge y C. W. Carrick [1] comunicaron en 1947 que tal material contenía un factor no identificado necesario para el crecimiento de pollitos, y en el año siguiente un concentrado preparado de esta fuente fue llamado «vitamina B_{13}» [2]. La noticia de que un concentrado de vitamina B_{13} promovía el crecimiento de pollos y ratas estimuló los estudios en otros laboratorios.

En 1956, H. R. Skeggs y colaboradores [3] sometieron un concentrado de «vitamina B_{13}» a una distribución de contracorriente y comprobaron las varias fracciones así obtenidas para ver su capacidad de favorecer el crecimiento de los microbios. Se encontró que ciertas fracciones eran muy activas en promover el crecimiento, en un medio libre de acetato, del *Lactobacillus acidophilus* (estirpe ATCC 4963). Se demostró que esta actividad era distinta de la del ácido lipoico, factor que promueve el crecimiento y se obtiene del hígado, y de la de todos los otros compuestos; estos estudios llevaron al descubrimiento de un nuevo factor reemplazador del acetato que fue llamado ácido mevalónico. En estos estudios la actividad de promover el crecimiento de los concentrados de «vitamina B_{13}» en los pollos no se confirmó; W. H. Ott y sus colegas [4] consideraron que las pruebas de crecimiento con los concentrados eran negativas, o por lo menos equívocas en los pollos. La purificación de la actividad sustituidora del acetato fue pues continuada utilizando ensayos de pureza basados en el crecimiento del *L. acidophilus* ATCC 4963 en un medio libre de acetato.

Para asegurarse de que la actividad pudiera ser debida a un compuesto conocido o a una combinación de compuestos conocidos se probaron más de 150 compuestos de importancia biológica; ninguno mostró actividad apreciable en promover el crecimiento del *L. acidophilus* en ausencia del acetato. La demostración de que el factor no era una forma combinada del ácido lipoico era particularmente importante, pues se había demostrado que este compuesto estaba presente en los concentrados. Cuando se demostró que los ensayos de pureza por métodos microbiológicos para el ácido lipoico y el «nuevo factor» no cambiaban después de hidrolizarlos con ácido sulfúrico normal, se concluyó que el material estudiado no contenía ningún conjugado del ácido lipoico que fuera sensible a un ácido y no disponible en microorganismos. Las recuperaciones casi exactas de la actividad en varios estudios de fraccionamiento fueron también importantes, pues hubiera habido pérdidas no justificables en la actividad si la respuesta microbial hubiese sido debida a una combinación de compuestos en vez de a uno solo. Experimentos posteriores con concentrados del nuevo factor demostraron que su actividad promovía el crecimiento del *Lactobacillus bifidus*, *L. bulgaricus* y del *Thermobacterium acidophilus*.

G. Tamura [5] detectó un factor de crecimiento en vino de arroz japonés (sake) y también en medios de cultivo en que habían crecido organismos tales como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Monilia*, *Willia* y *Lactobacillus*. El factor fue llamado ácido hióquico a causa de su actividad en favorecer el crecimiento da las «verdaderas bacterias hióquicas», *Lactobacillus homohiochi* y *L. heterohiochi*. Sobre la base

de tener idénticos espectros infrarrojos y actividades microbiológicas de compuestos puros obtenidos de ambas fuentes, G. Tamura y K. Folkers [6] comunicaron más tarde que los ácidos hióquico y mevalónico eran idénticos.

L. D. Wright y sus colegas [7] obtuvieron concentrados muy purificados del ácido mevalónico a partir de destilaciones solubles secas. La substancia activa fue extraída del material con metanol y esta fracción soluble en metanol fue purificada parcialmente por extracción continua con cloroformo. La porción soluble en cloroformo fue purificada por cromatografía (en Superfiltrol) y el material inerte en una serie de lavados selectos fue precipitado en etanol. Al pasar una solución acuosa del concentrado a través de una resina cambiadora de cationes (Dowex-50), el compuesto activo fluyó rápidamente, muy poco después del solvente y dejó detrás muchas impurezas. A partir de esta etapa se neutralizaron fracciones selectas y se absorbió el factor en una resina cambiadora de aniones (Dowex-1). El lavado selectivo de la resina con ácido fórmico 0,05 N dio lugar a una recuperación casi exacta de la actividad. Estas dos etapas de purificación con cambio de iones consiguieron una concentración cinco veces mayor. Después de varias distribuciones sucesivas en contracorriente de las fracciones más ricas entre las fases de una mezcla de etanol/agua/cloroformo, el factor fue obtenido como un aceite claro cuyo peso de distribución y curvas de actividad mostraban ser casi puro. Con unos 150 mg de aceite obtenidos de 800 kg de material de partida fue posible hacer los primeros estudios de su estructura.

DETERMINACION DE LA ESTRUCTURA

En una solución acuosa, el compuesto nuevamente aislado se comportaba como un ácido; en la titulación potenciométrica de una solución acuosa con álcali, la curva de titulación subía rápidamente y después se comportaba de una manera característica propia de las lactonas. El espectro de absorción de rayos infrarrojos del compuesto era también compatible con una función lactónica. Las bandas de absorción que se observaban en una solución clorofórmica, indicaban la presencia de grupos hidróxilos y estéricos. En solución morfolínica, la banda de absorción (5,78 μ) correspondiente a la función éster disminuía en intensidad durante 48 horas, y una nueva banda (6,1 μ), correspondiente a un ion carboxílico, aparecía y aumentaba lentamente en intensidad. Tal comportamiento es típico de las lactonas, y, en el modo de abrirse el anillo, se presumió que la función era una δ- más bien que una γ-lactona.

La parte más purificada del aceite fue convertida en bencidrilamida cristalizada antes de que se emprendieran nuevos estudios. Este derivado contenía un grupo C-metilo y otro hidróxilo, los cuales pudieron ser acilados. El análisis elemental de la bencidrilamida y su correspondiente monoacetato dieron la fórmula molecular $C_6H_{12}O_4$ para el compuesto activo y $C_6H_{12}O_3$ para la correspondiente lactona. Desde que los datos del espectro y de la titulación habían ya indicado que

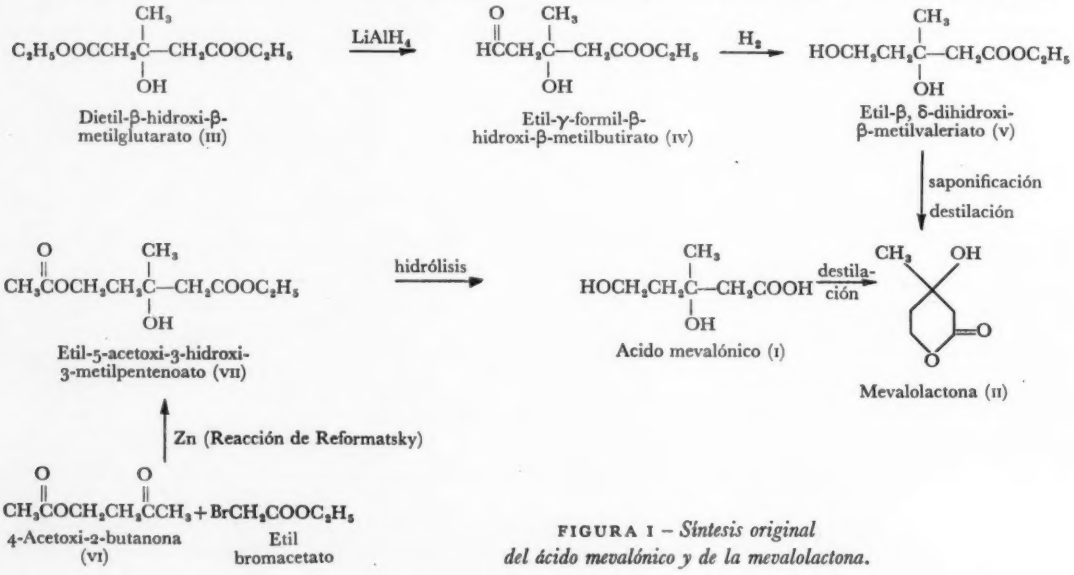


FIGURA 1 – *Síntesis original del ácido mevalónico y de la mevalolactona.*

el mismo factor tenía que ser un δ-hidroxiácido, se vio que colocando un grupo metílico y otro hidróxilo más en la cadena del carbono satisfaría la composición elemental y completaría la elucidación de la estructura.

Ni la lactona ni su correspondiente bencidrilamida reaccionaron con periodatos alcalinos o con hipoioditos, mostrando que la molécula no contiene un grupo γ-hidróxilo adyacente o un α-hidroxietil sustituyente. Una α-posición del grupo hidróxilo fue eliminada a causa del pK del ácido; como consecuencia, quedó como única posibilidad para el grupo hidróxilo la β-posición.

El grupo metílico también fue colocado en una β-posición. De las otras posibilidades fue eliminada la δ-posición como el lugar del grupo metílico porque el test del yodoformo fue negativo. De las otras tres posiciones restantes, fue elegida la β-posición porque el comportamiento del compuesto en la acetilación se explicaba mejor por la presencia de un grupo hidróxilo terciario.

Con esta base, D. E. Wolf y colaboradores [8, 9] asignaron las estructuras del ácido β,δ-dihidroxi-β-metilvalérico (I) y la β-hidroxi-β-metilvalerolactona (II) para las formas de los factores ácido y lactónico respectivamente. El nombre genérico de ácido mevalónico fue usado a continuación para el nuevo factor biológico activo.

SINTESIS DEL ACIDO DL-MEVALONICO

Esta conclusión estructural fue verificada por una síntesis inequívoca [9]. Los pasos sucesivos (III, IV, V, II) pueden verse en la Fig. 1. La actividad microbiológica de la mevalolactona sintética fue la mitad que la de la substancia ópticamente activa obtenida de las substancias solubles de las destilaciones.

Una ulterior síntesis de fundamental utilidad fue [10] se basaba en la condensación de la 4-acetoxi-2-butanona (VI, Fig. 1) con etilbromacetato. La hidrólisis del producto (VII) dio un equilibrio mixto del correspondiente ácido dihidróxilo y la lactona. La lactona pura fue aislada por destilación; el ácido puro se obtuvo como la sal *bis* N,N'-dibenciletilendiamónica, después de reaccionar la mezcla del ácido lactónico con un exceso de N,N'-dibenciletilendiamina en un medio semiacuoso.

SINTESIS DEL ACIDO DL-MEVALONICO RADIACTIVO

El estudio del papel del ácido mevalónico en la biosíntesis poliisoprenoica requirió ácido mevalónico marcado; se utilizaron las siguientes síntesis.

J. W. Cornforth y sus colegas [11] sintetizaron la 2-^{14}C-mevalolactona a partir de la 4-acetoxi-2-butanona (VI) y del etil 2-^{14}C-bromacetato (Fig. 1). La síntesis de la 4-^{14}C-mevalolactona [12] utilizó las reacciones claves de las dos anteriores síntesis de la mevalolactona (Fig. 2). Fue introducida una síntesis excelente de la 3', 4-^{13}C-mevalolactona [12] que partía del doblemente marcado diketeno (X) (Fig. 3).

SINTESIS DEL ACIDO (+)-MEVALONICO

La forma biológicamente activa del ácido es dextrorrotatoria. Ha sido obtenida por resolución química [13], y el ácido (−)-mevalónico ha sido obtenido por resolución enzimática del racemato [14]. El ácido (+)-mevalónico ha sido preparado directamente por síntesis enzimática [15, 16]; el 70% del (+)-isómero del racemato fue aislado

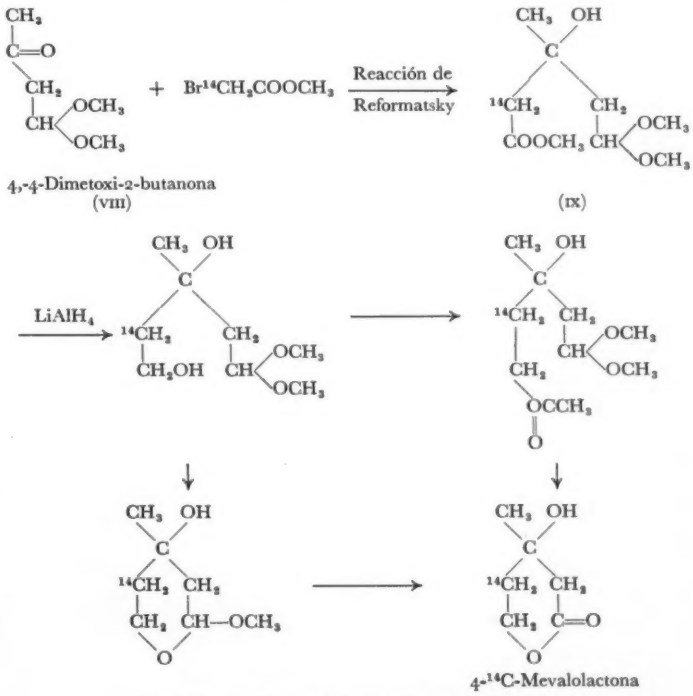


FIGURA 2 – *Síntesis de la 4-^{14}C-mevalolactona* [12].

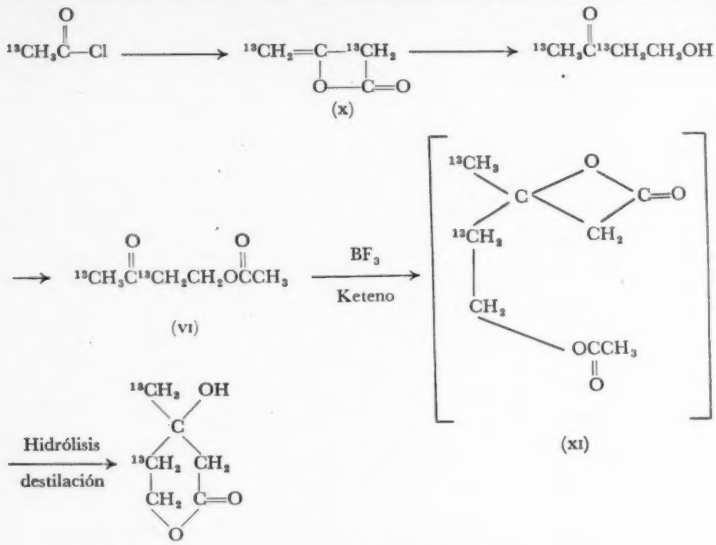


FIGURA 3 – *Síntesis de la 3',4-^{13}C-mevalolactona* [12].

como ácido fosfo-(+)-mevalónico después de una fosforilización selectiva con quinasa mevalónica en presencia de ATP.

U. Henning y sus colegas [16] consiguieron la síntesis del ácido (+)-mevalónico a partir de la coenzima A β-metilcrotonil por la reacción que se muestra más abajo, la cual fue realizada en dos etapas. La reacción de carboxilación fue completada en una sola etapa, pero las reacciones de hidratación y reducción fueron combinadas para evitar el paso de la coenzima A β-hidroxi-β-metilglutaril a acetoacetato por la presencia de una aldolasa presente en el sistema enzimático.

β-metilcrotonil CoA + ATP + CO_2 ⟶
β-metilglutaconil CoA + ADP + P_i
β-metilglutaconil CoA + H_2O ⟶
β-hidroxi-β-metilglutaril CoA
β-hidroxi-β-metilglutaril CoA
+ 2TPNH + $2H^+$ ⟶
ácido (+)-mevalónico + $2TPN^+$

CONFIGURACION DEL ACIDO MEVALONICO

El ácido (+)-mevalónico ha sido emparentado con el (+)-gliceraldehido a la manera de ácido quínico (Fig. 4, XII). M. Eberle y D. Arigoni [17] convirtieron el ácido quínico (XII) en la (+)-forma «innatural» de la mevalolactona según las reacciones de la Fig. 4. Después que estas reacciones produjeron la S-(+)-lactona biológicamente inactiva (XIII), las formas biológicamente activas del compuesto son designadas R-(−)-mevalolactona y ácido R-(+)-mevalónico. Una confirmación adicional para esta conclusión se obtuvo por comparación de la curva ópticorotatoria de dispersión de la bencidrilamida derivada de la S-(+)-lactona (XIII) con el derivado relacionado con el otro derivado de la bencidrilamida a partir del antípoda del ácido mevalónico.

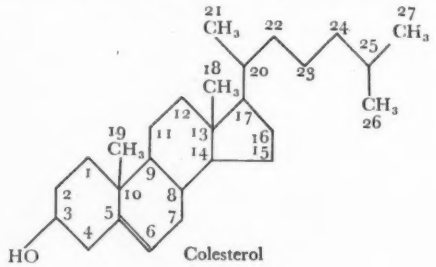
EL ACIDO MEVALONICO EN LA BIOSINTESIS

Biosíntesis de los esteroles

La biosíntesis de los esteroles y de los terpenos ha sido investigada por bioquímicos y biólogos durante las dos últimas décadas. Cronológicamente los descubrimientos como el del acetato, escualeno, lanosterol, ácido mevalónico e isopentilpirofosfato significaron verdaderos jalones en la ruta de la síntesis biológica (Fig. 5) y fueron precursores efectivos del colesterol.

Acetato

El papel del acetato como precursor del colesterol fue establecido en experimentos de alimentación de animales y por el uso de acetato marcado *in vitro*. K. Bloch y D. Rittenberg [18] observaron que la ingestión de ácido deuteroacético por ratones y ratas conducía a la formación de deuterocolesterol; la distribución del deuterio mostró que aquel acetato era un precursor de ambos, de la cadena lateral y del núcleo. Otros datos excluyeron los ácidos propiónico, butírico y succínico — así como ácidos grasos de cadena más larga, como el esteárico y el palmítico — de una participación directa en la biosíntesis. Después de la adición de $^{13}CH_3{}^{14}COOH$ y $^{14}CH_3{}^{13}COOH$ a una homogeneización de hígado de rata, la razón entre el ^{13}C y el ^{14}C en el colesterol biosintético



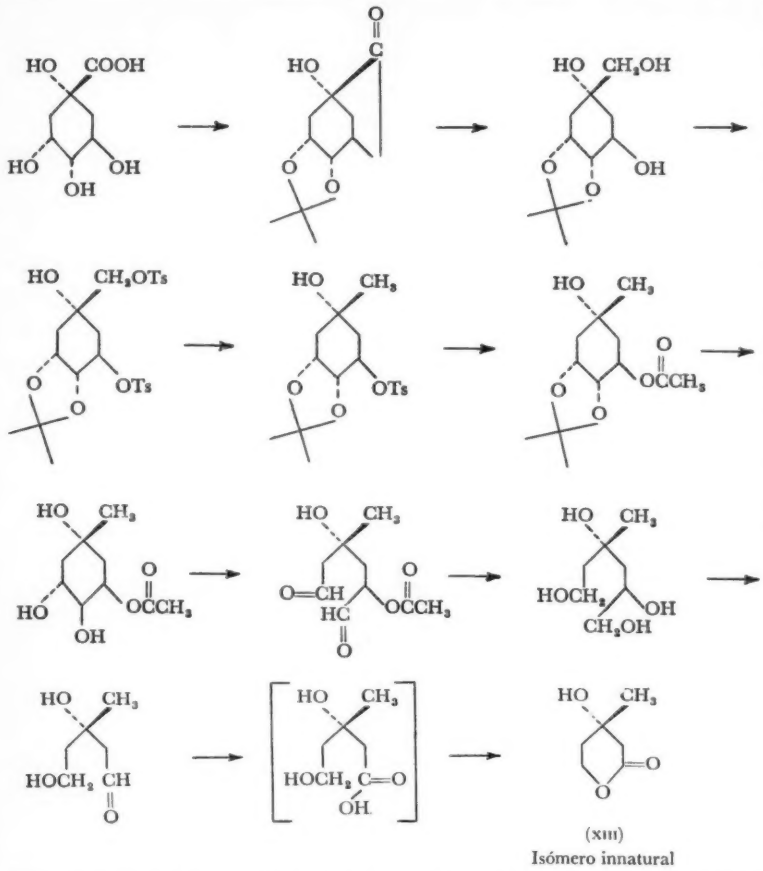


FIGURA 4 – *Síntesis estereoselectiva de la (+)-mevalolactona a partir del ácido quínico* [17]. *Ts = sulfonato de tolueno.*

mostraba que aproximadamente se habían incorporado un 20% más de grupos metílicos que de grupos carboxílicos [19]. De esto se dedujo que tenía lugar cierta descarboxilación en el curso de la biosíntesis. La degradación selectiva del colesterol radiactivo confirmó que el acetato era un precursor tanto de la cadena como del núcleo. La distribución del carbono radiactivo en el colesterol biosintetizado ha sido determinada a partir del $^{14}CH_3COOH$ y del $CH_3{}^{14}COOH$ en lonjas de hígado de rata; 15 átomos de carbono del colesterol provenían del grupo metílico y 12 del grupo carboxílico del acetato [19, 20].

La degradación selectiva del colesterol biosintético mostraba que los carbonos 2, 4, 6, 8 y 10 provenían del grupo carboxílico y los carbonos 1, 3, 5 y 19 provenían del grupo metílico del acetato [20]. J. Wuersch, R. L. Huang y K. Bloch [21] demostraron que toda la cadena lateral de la molécula del esterol provenía del acetato. Después de añadir acetato marcado a un sistema *in vitro* y de selectivas degradaciones de la cadena lateral, se vio que los carbonos 21, 22, 24, 26 y 27 provenían del grupo metílico del acetato, y que los carbonos 20, 23 y 25 provenían del grupo carboxílico. Cuando estos investigadores consideraron la derivación biosintética de los átomos de carbono de la cadena lateral según las bases del mecanismo de Bonner y Arreguin [22] (Fig. 6) para la conversión del acetato en isopreno, se llegó a la conclusión de que cinco carbonos unidos en relación con el isopreno participan en la biosíntesis del colesterol a partir del acetato.

El esquema de la reacción de la Fig. 6 recibió una nueva confirmación cuando se demostró por R. O. Brady y S. Gurin [23] que el acetato metil marcado quedó incorporado al colesterol en cortes de hígado de rata sin degradación de los dos carbonos unidos. Como las funciones del acetoacetato se aceptaban como precursoras del colesterol, se sugirió [24] que el paso siguiente de la biosíntesis podría implicar la condensación del acetoacetil coenzima A con el acetil coenzima A para producir β-hidroxi-β-metilglutaril coenzima A (XIV). Estos autores demostraron que se requería DPN, ATP y coenzima A para la incorporación del acetato marcado, piruvato y acetil coenzima A al colesterol en extractos de partículas deshidratadas de hígado de rata, y también observaron la conversión del acetato señalado en β-hidroxi-β-metilglutarato en el mismo extracto. H. Rudney [25] demostró que la radiactividad del acetato marcado quedó incorporada a los ácidos β-hidroxi-β-metilglutárico y β, β-dimetilacrílico en hígado homogeneizado y en extractos del mismo. La distribución de la radiactividad en el esqueleto de los carbonos de cada compuesto se estableció

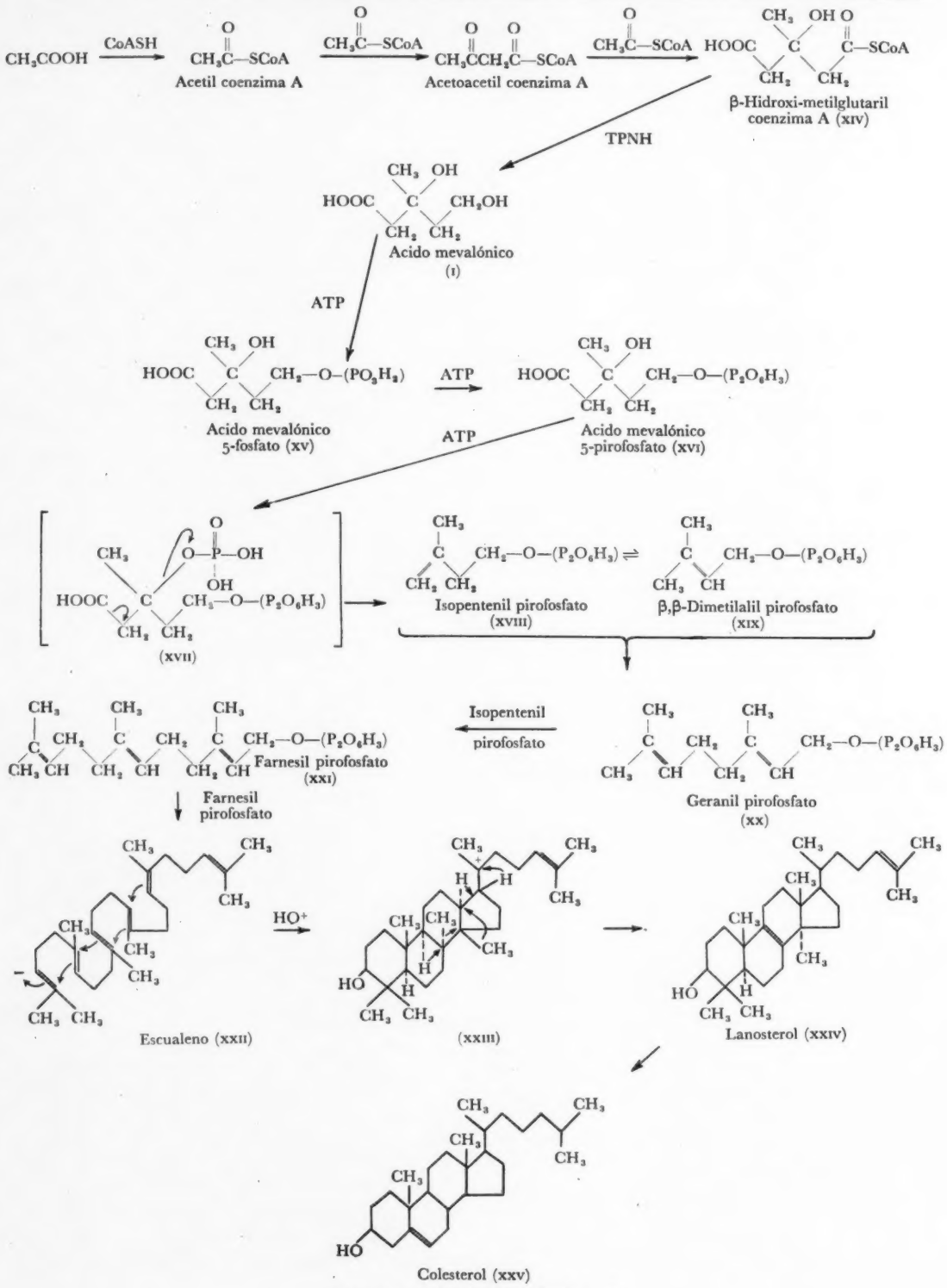


FIGURA 5 – *Biosíntesis del colesterol.*

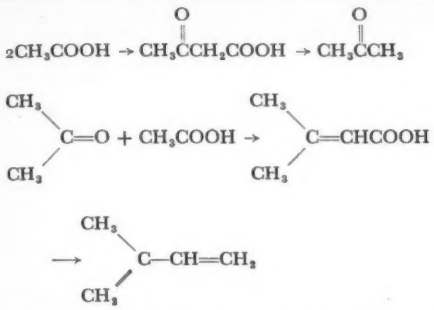


FIGURA 6 – *Proceso de conversión del acetato en isopreno* [22].

por degradación y era compatible con la idea de que tales uniones podrían ser utilizadas en biosíntesis sin necesidad de que fueran degradadas las dos primeras uniones de los carbonos. Una investigación detallada de las reacciones condujo a la conversión del acetato en hidroximetilglutarato (XIV) demostrando conclusivamente que el β-hidroxi-β-metilglutaril coenzima A se forma a partir de la condensación de la coenzima de acetil coenzima A y acetoacetil coenzima A con la hidrólisis concomitante del enlace tioestérico [26].

Mevalonato

El conocimiento de la actividad microbiológica del ácido mevalónico, y de la semejanza estructural entre el ácido mevalónico y el ácido β-hidroxi-β-metilglutárico sugirió que se hicieran investigaciones en la posible función del nuevo factor en la biosíntesis del colesterol. Empleando células libres de hígado de rata homogeneizado, P. A. Tavormina, M. H. Gibbs y J. W. Huff [27] demostraron por experimentos de radiactividad que el 43,4% del ácido DL-2-^{14}C-mevalónico se incorporaba al colesterol; por contraste, sólo el 0,16% y el 3,8% respectivamente de los isótopos del ácido 3'-^{14}C-β-hidroxi-β-metilglutárico y del ácido 4-^{14}C-β, β-dimetilglutárico quedaron incorporados al colesterol en igualdad de condiciones. Admitiendo que solamente se utilizó uno de los antípodas ópticos del racemato, se vio claro que el ácido mevalónico era incorporado muy eficientemente. Se puso también en claro que el ácido mevalónico era un precursor importante de los esteroides y de los productos isoprenoides naturales en general y que estaba íntimamente relacionado con la «actividad isoprénica». Estudios posteriores [28] sobre la incorporación del ^{14}C isótopo a partir del ácido 2-^{14}C-mevalónico y del ácido 1-^{14}C-mevalónico mostraron que el grupo carboxílico del ácido mevalónico es eliminado durante la biosíntesis del colesterol y que todos los demás carbonos remanentes son incorporados.

Acido meváldico

Se ha estudiado el posible derivado aldehídico intermedio, el ácido meváldico, a partir de la reducción de un grupo carboxílico del ácido β-hidroxi-β-metilglutárico pasándolo a grupo hidroximetilo en la síntesis enzimática del ácido mevalónico. Fue sintetizado [13, 29] a partir del dimetilacetal del acetoacetaldehido y del etilbromacetato de modo análogo a una síntesis del ácido mevalónico (Fig. 1). El ácido meváldico tiene una reacción aldehídica muy fuerte, cuya presencia en una solución fue claramente establecida por reducción del ácido mevalónico y por otros métodos diferentes. Aunque la actividad microbiológica del ácido DL-meváldico para el *L. acidophilus* es solamente el 0,5% de la del ácido DL-mevalónico, la eficiencia con que es incorporado al colesterol por el hígado de rata no puede distinguirse de la del ácido mevalónico [30].

Escualeno

El ácido mevalónico está también relacionado con el escualeno (XXII); R. G. Langdon y K. Bloch [31] demostraron que era un precursor del colesterol en el animal vivo. También demostraron que la utilización del escualeno en la rata es diez o veinte veces más eficiente que la del acetato. J. W. Cornforth y G. Popják [32] estudiaron *in vitro* la biosíntesis del escualeno a partir de acetato marcado y aclararon la derivación de los átomos de carbono en el esqueleto del escualeno. El sistema de marcaje del escualeno fue concebido pensando en que éste era un precursor directo, porque doblando el propio escualeno marcado podría producir un núcleo de esterol marcado precisamente de la misma manera que había sido establecido experimentalmente. Estos experimentos confirmaron sustancialmente un camino de biosíntesis que a partir del acetato y a través del escualeno conduce al esterol.

Los primeros conocimientos sobre los intermediarios entre el ácido mevalónico y el escualeno fueron obtenidos de los estudios con extractos de levadura. A partir de estas investigaciones, fueron identificados como sucesivos intermediarios en la biosíntesis del escualeno el ácido mevalónico 5-fosfato (XV), el ácido mevalónico 5-pirofosfato (XVI), el 3-metil-3-butenil 1-pirofosfato (XVIII, isopentenil pirofosfato), el geranil pirofosfato (XX) y el farnesil pirofosfato (XXI) (Fig. 5).

Siendo así que el ATP era necesario para la

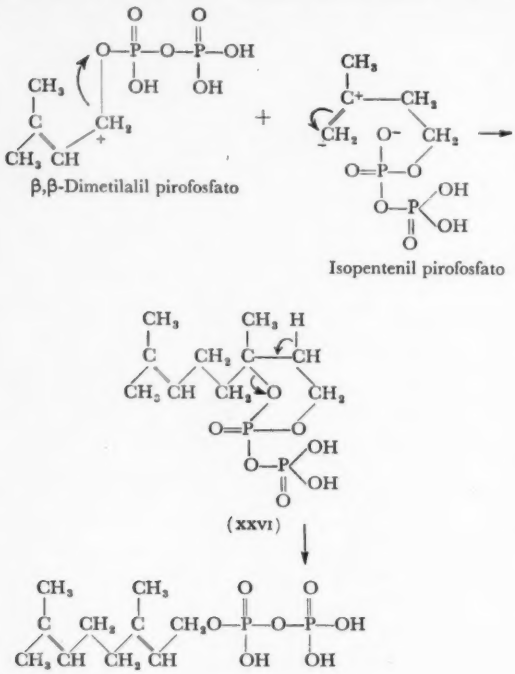


FIGURA 7 – *Proceso de la dimerización del isopentenil pirofosfato a geranil pirofosfato* [38, 40–42].

reacción enzimática, se sugirió [33] que se formaban intermediarios fosforilizados en la conversión del ácido mevalónico en escualeno. T. T. Tchen [34] demostró que la enzima que convierte el ácido mevalónico en escualeno en un extracto de levadura, es una quinasa; en presencia de ATP, esta quinasa convierte el ácido mevalónico en ácido mevalónico 5-fosfato (XV). Este último se convierte en escualeno en el sistema enzimático, y se llegó a la conclusión de que el ácido mevalónico 5-fosfato es el primer intermediario en la síntesis. La existencia de otros intermediarios fosforilizados del ácido mevalónico fue predicha [35] basándose en que el ATP se requiere para convertir el ácido mevalónico 5-fosfato en escualeno. Uno de los nuevos derivados fosforilizados descubiertos en esta investigación fue convertido en escualeno en ausencia de ATP.

Han sido aislados e identificados dos productos de la conversión enzimática del ácido mevalónico 5-fosfato por la levadura en presencia de ATP [36, 37]. El primero fue identificado como ácido mevalónico 5-pirofosfato (XVI). La radiactividad hubiera sido incorporada en este intermediario si el material de partida hubiera sido o el ácido 1-^{14}C- o el ácido 2-^{14}C- mevalónico 5-fosfato; de aquí se sigue que la conversión en el intermediario difosfórico (XVI) procedió por la retención del grupo carboxílico [37]. El segundo intermediario fue identificado como el 3-metil-3-butenil-1-pirofosfato (XVIII). Como la formación del isopentenil pirofosfato a partir del ácido mevalónico 5-pirofosfato requiere ATP, la fosforilización debe ser una parte esencial de la reacción de eliminación. Se presumió que para la conversión del ácido mevalónico 5-pirofosfato en isopentenil pirofosfato la fosforilización tenía lugar en el grupo hidróxilo terciario, ya que la labilidad química de un éster terciario conduciría a la desaturación. El mecanismo para la reacción que partiendo del intermediario trifosforado (XVII) conduce al isopentenil pirofosfato se valora como una descarboxilación-desfosforilización concertada [37]; la protonación de la cadena de carbono no fue incluída como una etapa en el mecanismo.

La isomerización enzimática del isopentenil pirofosfato (XVIII) a β,β-dimetilalil pirofosfato (XIX) ha sido observada en extractos acuosos de levadura por F. Lynen y sus colegas [38, 39]. El geranil pirofosfato (XXI) ha sido identificado también por estos investigadores como intermediario en la biosíntesis del escualeno a partir del ácido mevalónico por la célula viva en extractos de levadura. Un proceso para la síntesis del geranil pirofosfato puede considerarse (Fig. 7) como la alquilación de un doble enlace aislado por un ion carbónico

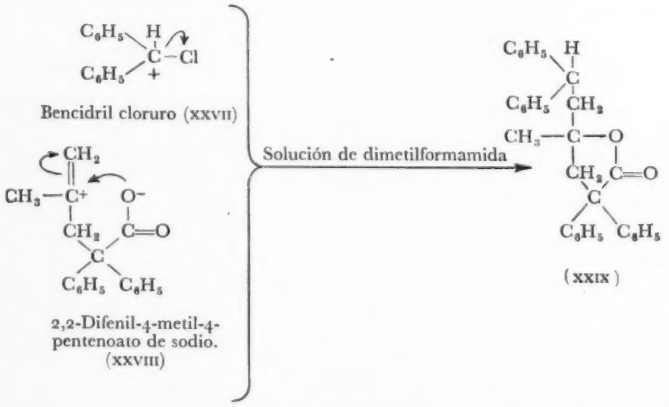


FIGURA 8 – *Una reacción de alquilación y ciclización semejante a la de dimerización del «acetato activo»* [42].

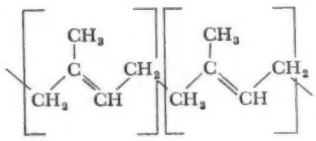
alílico [38, 40, 41]. El isopentenil pirofosfato se isomeriza a β,β-dimetilalil pirofosfato y probablemente existe como un equilibrio de la mezcla de las dos formas. Uno de los isómeros puede ser considerado como el electrófilo y el otro como el nucleófilo necesarios para la condensación de las dos moléculas que producen un dímero. La parte desaturada del isopentenil pirofosfato provee de un centro nucleofílico; el β,β-dimetilalil pirofosfato, según la semejanza con el comportamiento del bencilo y de otros ésteres alílicos, es susceptible de atacar el carbono oxigenado por el nucleófilo.

W. S. Johnson y R. A. Bell [42] han sugerido que la reacción de alquilación se realiza con la asistencia anquimérica de la porción pirofosfato de isopentenil pirofosfato, conduciendo al compuesto cíclico intermediario (XXVI). El medio fosfato cíclico terciario sería altamente inestable y pasaría inmediatamente a geranil pirofosfato. La razón para admitir la existencia de tal intermediario se obtuvo del estudio de la reacción de alquilación que se muestra en la Fig. 8. El aislamiento de la γ-lactona (XXIX) del supuesto producto de la alquilación no solamente apoya el concepto de que se ha formado fosfato cíclico terciario durante la polimerización del isopentenil pirofosfato, sino que da pie para nuevas investigaciones de reacciones de ciclización en medio neutro, o quizás también en medio alcalino.

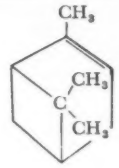
El camino de biosíntesis seguido a partir del ácido mevalónico hasta el escualeno en hígado de rata es semejante al de las células de la levadura (Fig. 5). Según G. Popják y sus colegas [43–46], la serie incluye reacciones como la conversión del ácido mevalónico en ácido mevalónico 5-fosfato, ácido mevalónico 5-pirofosfato e isopentenil pirofosfato (XVIII). La serie continúa con la isomerización de la última de estas reacciones a dimetilalil pirofosfato (XIX) y la condensación de estos isómeros para producir el geranil pirofosfato (XX), que se condensa con el isopentenil pirofosfato para producir el farnesil pirofosfato.

Lanosterol

Una vez establecido que el escualeno era un intermediario en la biogénesis del colesterol, R. B. Woodward y K. Bloch [47] propusieron que el lanosterol (XXIV) era un intermediario entre el escualeno y el colesterol en el camino de la biosíntesis. Se demostró la biosíntesis del lanosterol a partir de acetato marcado en un tejido homogeneizado [48], y se vio la ulterior conversión de este lanosterol marcado en colesterol.



Caucho
(XXX)



α-Pineno
(XXXI)

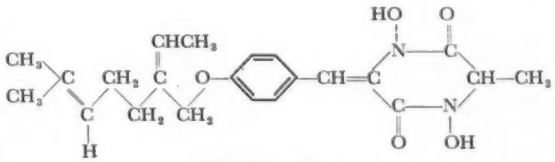
La ciclización del escualeno en lanosterol es considerada como una simple reacción que entraña la participación concertada al menos de dieciséis centros. Un proceso general propuesto por A. Eschenmoser, L. Ruzicka, O. Jeger y D. Arigoni [49] supone la formación de un ion carbónico intermedio después de la reacción de un activador catiónico, tal como un HO^+, con un substrato doblado adecuadamente; para la conversión del escualeno en lanosterol la reacción puede considerarse como una serie de ataques nucleófilos sobre centros electrónico-deficientes por electrones de doble enlace. Con una molécula de escualeno adecuadamente preparada, el cambio concertado de electrones iniciado por el HO^+ es transmitido a través de cinco dobles enlaces para formar la estructura tetracíclica (XXIII) conteniendo un ion carbónico en el C-20. Después de la 1,2-migración de dos grupos metílicos y dos átomos de hidrógeno, se elimina un protón de la 9-posición para formar la molécula estable del lanosterol.

Colesterol

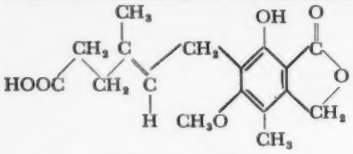
La conversión del lanosterol en colesterol requiere la partición oxidativa de tres grupos metílicos. Han sido identificados varios intermediarios y nuevos precursores ejerciendo una función entre el lanosterol y el colesterol [50, 51].

«ISOPRENO ACTIVO»

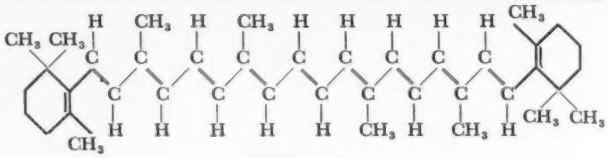
Una etapa crítica en la participación del ácido mevalónico en la biosíntesis del colesterol es su conversión en isopentenil pirofosfato (XVIII), que es considerado como «isopreno activo». Este compuesto, con su isómero β,β-dimetilalil pirofosfato, constituye la unidad básica para la



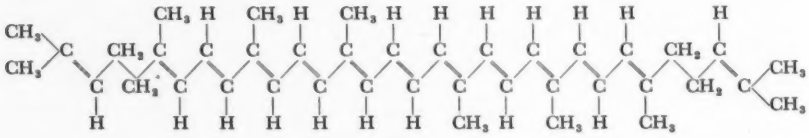
Micelianamida
(XXXII)



Acido micofenólico
(XXXIII)



β-Caroteno
(XXXIV)



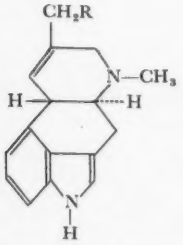
Licopeno
(XXV)

polimerización bioquímica. A medida que se forman los polímeros a partir de esta unidad básica, los cuales están sujetos a otras transformaciones químicas, se obtiene una amplia variedad de compuestos y polímeros isoprenoides naturalmente incidentales.

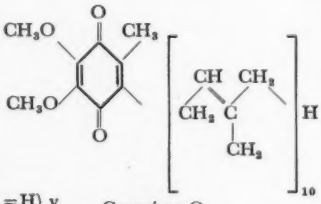
BIOSINTESIS DE LOS ISOPRENOIDES

La importancia del ácido mevalónico en la biosíntesis de productos isoprenoides naturales ha sido sustanciada por numerosas investigaciones, basadas en la incorporación de ácido mevalónico radiactivo dentro de una variedad de moléculas, como el caucho, los terpenos y los alcaloides.

R. B. Park y J. Bonner [52] observaron la incorporación del ácido 2-^{14}C-mevalónico en el caucho (XXX) por un sistema enzimático crudo a partir del latex de la *Hevea brasiliensis*; la eficiencia de conversión era aproximadamente de un 2%. Estudios posteriores [53] dieron un 9,3% en la conversión de ácido mevalónico en poliisopreno. Ha sido demostrada la conversión del isopentenil pirofosfato en caucho [54].



Agroclavina (XXXVI, R = H) y
elimoclavina (XXXVII, R = OH)



Coenzima Q_{10}
(XXXVIII)

En el campo de los terpenos, R. G. Stanley [55] mostró que las semillas del *Pinus attenuata* incorporan ácido 2-^{14}C-mevalónico en la fracción monoterpénica, que se compone casi exclusivamente de α-pineno (XXXI). La incorporación del ácido 2-C^{14}-mevalónico en la cadena terpenoide lateral de diez carbonos de la micelianamida (XXXII) por el *Penicillium griseofulvum* y la de ácido micofenólico en la cadena lateral de siete carbonos por el *Penicillium brevi-compactum* [56] ha sido asimismo constatada. Los siete carbonos unidos se consideran como derivados provenientes de un componente de geraniol.

La incorporación del ácido 2-^{14}C-mevalónico en el β-caroteno (XXXIV) en cultivos del hongo *Phycomyces blakesleeanus* ha sido demostrada por G. D. Braithwaite y T. W. Goodwin [57], quienes también observaron la incorporación del factor señalado en el β-caroteno en lonjas aisladas de zanahorias. Se ha visto [58] que el moho *Mucor hiemalis* puede incorporar ácido 2-^{14}C-mevalónico al β-caroteno. Se ha observado la síntesis enzimática del licopeno (XXXV) a partir del ácido 2-^{14}C-mevalónico en tomate homogeneizado [59].

La importancia biosintética del ácido mevalónico ha sido demostrada también en otros campos. Así se ha visto [60] que el *Claviceps purpurea*, hongo parásito del centeno, incorpora el isótopo ^{14}C a partir de la 2-^{14}C-mevalolactona en los alcaloides agroclavina (XXXVI) y elimoclavina (XXXVII). Este y el ácido 4-^{14}C-mevalónico pueden ser incorporados en la cadena lateral isoprenoide de la coenzima Q_{10} (XXXVIII) [61, 62].

Las Figs. 2, 3 y 4 son reproducción de «Advances in Enzymology», Vol. XXIII, por cortesía de Interscience Publishers Inc.

REFERENCIAS

[1] NOVAK, A. F., HAUGE, S. M. y CARRICK, C. W. *Poult. Sci.*, **26**, 604, 1947.

[2] NOVAK, A, F. y HAUGE, S. M. *J. biol. Chem.*, **174**, 647, 1948.

[3] SKEGGS, H. R., WRIGHT, L. D., CRESSON, E. L., MACRAE, G. E. D., HOFFMAN, C. H., WOLF, D. E. y FOLKERS, K. *J. Bact.*, **72**, 519, 1956.
[4] OTT, W. H., DICKINSON, A. M., VAN INDERSTINE, A., BAZEMORE, A. W., PAGE, A. C. y FOLKERS, K. *J. Nutr.*, **64**, 525, 1958.
[5] TAMURA, G. *J. gen. appl. Microbiol.*, **2**, 431, 1956.
[6] TAMURA, G. y FOLKERS, K. *J. org. Chem.*, **23**, 772, 1958.
[7] WRIGHT, L. D., CRESSON, E. L., SKEGGS, H. R., MACRAE, G. D. E., HOFFMAN, C. H., WOLF, D. E. y FOLKERS, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **78**, 5273, 1956.
[8] WOLF, D. E., HOFFMAN, C. H., ALDRICH, P. E., SKEGGS, H. R., WRIGHT, L. D. y FOLKERS, K. *Ibid.*, **78**, 4499, 1956.
[9] *Idem. Ibid.*, **79**, 1486, 1957.
[10] HOFFMAN, C. H., WAGNER, A. F., WILSON, A. N., WALTON, E., SHUNK, C. H., WOLF, D. E., HOLLY, F. W. y FOLKERS, K. *Ibid.*, **79**, 2316, 1957.
[11] CORNFORTH, J. W., CORNFORTH, R. H., POPJÁK, G. y YOUHOTSKY GORE, I. *Biochem. J.*, **69**, 146, 1948.
[12] CORNFORTH, J. W., CORNFORTH, R. H., PELTER, A., HORNING, M. G. y POPJÁK, G. *Tetrahedron*, **5**, 311, 1959.
[13] SHUNK, C. H., LINN, B. O., HUFF, J. W., GILFILLAN, J. L., SKEGGS, H. R. y FOLKERS, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **79**, 3294, 1957.
[14] LYNEN, F. y GRASSL, M. *Z. physiol. Chem.*, **313**, 291, 1958.
[15] LYNEN, F., EGGERER, H., HENNING, U. y KESSEL, I. *Angew. Chem.*, **70**, 738, 1958.
[16] HENNING, U., MÖSLEIN, E. M. y LYNEN, F. *Arch. Biochem. Biophys.*, **83**, 259, 1959.
[17] EBERLE, M. y ARIGONI, D. *Helv. Chim. Acta*, **43**, 1508, 1960.
[18] BLOCH, K. y RITTENBERG, D. *J. biol. chem.*, **143**, 297, 1942; **145**, 625, 1942.
[19] LITTLE, H. N. y BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **183**, 33, 1950.
[20] CORNFORTH, J. W., HUNTER, G. D. y POPJÁK, G. *Biochem. J.*, **54**, 597, 1953; *Arch. Biochem. Biophys.*, **42**, 482, 1953.
[21] WUERSCH, J., HUANG, R. L. y BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **195**, 439, 1952.
[22] BONNER, J. y ARREGUIN, B. *Arch. Biochem. Biophys.*, **21**, 109, 1949.
[23] BRADY, R. O. y GURIN, S. *J. biol. Chem.*, **189**, 371, 1951.
[24] RABINOWITZ, J. L. y GURIN, S. *Ibid.*, **208**, 307, 1954.
[25] RUDNEY, H. *J. Amer. chem. Soc.*, **76**, 2595, 1954; **77**, 1698, 1955.
[26] *Idem. J. biol. Chem.*, **227**, 363, 1957.
[27] TAVORMINA, P. A., GIBBS, M. H. y HUFF, J. W. *J. Amer. chem. Soc.*, **78**, 4498, 1956.
[28] TAVORMINA, P. A. y GIBBS, M. H. *Ibid.*, **78**, 6210, 1956.
[29] EGGERER, H. y LYNEN, F. *Liebigs Ann.*, **608**, 71, 1956.
[30] FOLKERS, K., SHUNK, C. H., LINN, B. O., ROBINSON, F. M., WITTREICH, P. E., HUFF, J. W., GILFILLAN, J. L. y SKEGGS, H. R. «Ciba Foundation Symposium on Biosynthesis of Terpenes and Sterols», pag. 20. J. & A. Churchill Ltd, Londres. 1959.
[31] LANGDON, R. G. y BLOCH, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **74**, 1869, 1952.
[32] CORNFORTH, J. W. y POPJÁK, G. *Biochem. J.*, **58**, 403, 1954.
[33] ADMUR, B. H., RILLING, H. y BLOCH, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **79**, 2646, 1957.
[34] TCHEN, T. T. *Ibid.*, **79**, 6344, 1957; *J. biol. Chem.*, **233**, 1100, 1958.
[35] PHILLIPS, A. H., TCHEN, T. T. y BLOCH, K. *Fed. Proc.*, **17**, 289, 1958.
[36] CHAYKIN, S., LAW, J., PHILLIPS, A. H., TCHEN, T. T. y BLOCH, K. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **44**, 998, 1958.
[37] BLOCH, K., CHAYKIN, S., PHILLIPS, A. H. y DE WAARD, A. *J. biol. Chem.*, **234**, 2595, 1959.
[38] LYNEN, F., EGGERER, H., HENNING, U. y KESSEL, I. *Angew. Chem.*, **70**, 738, 1958.
[39] LYNEN, F., AGRANOFF, B. W., EGGERER, H., HENNING, U. y MÖSLEIN, E. M. *Angew Chem.*, **71**, 657, 1959.
[40] RILLING, H. C. y BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **234**, 1424, 1959.
[41] CORNFORTH, J. W. *Tetrahedron Lett.*, No. 19, 29, 1959.
[42] JOHNSON, W. S. y BELL, R. A. *Ibid.*, No. 12, 27, 1960.
[43] DE WAARD, A. y POPJÁK, G. *Biochem. J.*, **73**, 410, 1959.
[44] LEVY, H. R. y POPJÁK, G. *Ibid.*, **72**, 35P, 1959; 75, 417, 1960.
[45] POPJÁK, G. *Tetrahedron Lett.*, No. 19, 19, 1959.
[46] GOODMAN, DE W. S. y POPJÁK, G. *Biochem. J.*, **74**, 35P, 1960; *J. Lipid Res.*, **1**, 286, 1960.
[47] WOODWARD, R. B. y BLOCH, K. *J. Amer. chem. Soc.*, **75**, 2023, 1953.
[48] CLAYTON, R. B. y BLOCH, K. *J. biol. Chem.*, **218**, 305, 319, 1956.
[49] ESCHENMOSER, A., RUZICKA, L., JEGER, O. y ARIGONI, D. *Helv. Chim. Acta*, **38**, 1890, 1955.
[50] CORNFORTH, J. W. *J. Lipid Res.*, **1**, 3, 1959.
[51] CRABBÉ, P. *Rec. chem. Progr.*, **20**, 189, 1959.
[52] PARK, R. B. y BONNER, J. *J. biol. Chem.*, **233**, 340, 1958.
[53] KEKWICK, R. G. O., ARCHER, B. L., BARNARD, D., HIGGINS, G. M. C., MCSWEENEY, G. P. y MOORE, C. G. *Nature, Lond.*, **184**, 268, 1959.
[54] HENNING, U., MÖSLEIN, E. M. y LYNEN, F. *Biochem. Z.*, **333**, 534, 1961.
[55] STANLEY, R. G. *Nature, Lond.*, **182**, 738, 1958.
[56] BIRCH, A. J., ENGLISH, R. J., MASSY-WESTROPP, R. A. y SMITH, H. *J. chem. Soc.*, 369, 1958.
[57] BRAITHWAITE, G, D. y GOODWIN, T. W. *Biochem. J.*, **66**, 13P, 31P, 1957.
[58] GROB, E. C. *Chimia*, **11**, 338, 1957.
[59] SHNEOUR, E. y ZABIN, I. *J. biol. Chem.*, **234**, 770, 1959.
[60] BIRCH, A. J., MCLOUGHLIN, B. J. y SMITH, H. *Tetrahedron Lett.*, No. 7, 1, 1960.
[61] GLOOR, U. y WISS, O. *Experientia*, **14**, 410, 1958.
[62] GLOOR, U., SCHINDLER, O. y WISS, O. *Helv. Chim. Acta*, **43**, 2089, 1960.

El proyecto Mohole

SIR EDWARD BULLARD

Hace tiempo se sabe que existe un cambio de las propiedades de las rocas de la Tierra a la profundidad de unos 35 km bajo la superficie de los continentes. Más recientemente se ha comprobado que esta discontinuidad denominada Moho se encuentra tan sólo a la profundidad de 5 km bajo el fondo del océano. En el presente artículo se describe el proyecto para alcanzar esta discontinuidad por medio de un sondeo y se discuten los resultados obtenidos perforando hasta una profundidad menor un taladro experimental.

LA DISCONTINUIDAD DE MOHOROVIČIĆ

En la mañana del día 8 de octubre de 1909 se produjo a unos 40 km al sur de Zagreb, en Croacia, un terremoto que fue registrado en todas las estaciones de Europa. Los sismogramas correspondientes fueron estudiados por el Dr. Andrija Mohorovičić, Director del Observatorio Meteorológico de Zagreb [5], quien observó que, como sucedía en otros terremotos, aparecían dos clases de ondas que podrían interpretarse como las ondas de compresión y distorsión que requiere la teoría de la propagación de las ondas elásticas a través de los cuerpos sólidos. En las ondas de compresión P, el movimiento de oscilación de las partículas se produce en la dirección de la propagación de la onda, como lo demuestra la Fig. 1*a*. En las ondas de distorsión S, el movimiento de las partículas es en ángulo recto con la dirección de propagación de la onda (Fig. 1*b*). La existencia y significado de estos dos tipos de ondas son conocidos desde hace algunos años; pero el nuevo descubrimiento hecho por Mohorovičić fue que existian dos ondas P. En distancias cortas la primera onda que llega, avanza a una velocidad que varía de un sitio a otro entre $5\frac{1}{2}$ y $6\frac{1}{2}$ km/s. A la distancia de unos 170 km esta onda es alcanzada por otra onda P que avanza a la velocidad de 8,1 km/s. Dentro de un margen de distancia, a uno y otro lado de este punto, normalmente hasta unos 800 km, se pueden registrar las dos ondas, como lo demuestra el sismograma de la Fig. 5. Más allá de esta distancia la onda más lenta se desvanece. La Fig. 2 muestra los tiempos de desplazamiento de las dos ondas en función de la distancia.

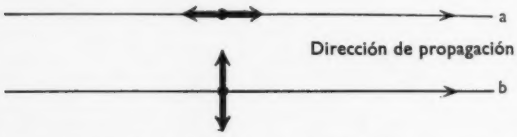


FIGURA 1 – *Movimiento de una partícula en una onda de compresión* (a) *y en una onda de distorsión* (b).

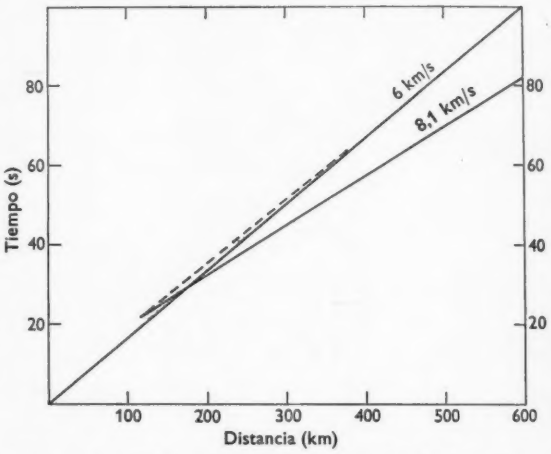


FIGURA 2 – *Tiempos de recorrido de las ondas sísmicas. La línea quebrada da el tiempo de recorrido de la onda reflejada.*

Mohorovičić sugirió que la onda más lenta de las dos ondas P se propagaba por el camino directo entre el foco del terremoto y el sismógrafo, mientras que la onda más rápida era refractada por una discontinuidad a la profundidad aproximada de 50 km (Fig. 3). Esta sugestión ha sido generalmente aceptada, y la discontinuidad ha sido designada con el nombre de Mohorovičić o discontinuidad Moho. Mohorovičić sobreestimaba

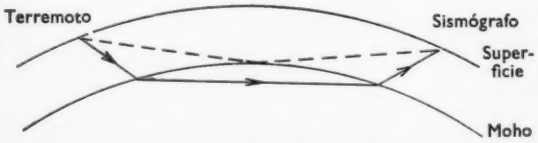


FIGURA 3 – *Corte de la Tierra que muestra la refracción de una onda sísmica en la Moho. La línea quebrada muestra la marcha de la onda reflejada. Se ha exagerado la curvatura de la Tierra.*

FIGURA 4 – *A. Mohorovičić.*

esta profundidad, que varía de un sitio a otro entre 30 y 45 km. Si la discontinuidad es clara, es posible observar una onda reflejada desde la Moho, y la línea quebrada de la Fig. 3 muestra la marcha de esta onda. Varios investigadores pretenden haber detectado esta onda reflejada, pero es difícil afirmar su existencia, pues el registro muestra los continuos cambios de las ondas P. La cuestión es importante dado que una reflexión sólo es posible si el cambio en la velocidad sísmica se produce dentro de los límites de un espesor menor que una longitud de onda. A menos que sea posible observar las ondas reflejadas, es difícil asegurar si la Moho es una discontinuidad efectiva o si el cambio de velocidad sísmica se desarrolla en profundidad, en el espacio de unos pocos kilómetros.

Las observaciones efectuadas en el mar utilizando explosiones como fuente de energía e hidrófonos en el agua, como detectores, han

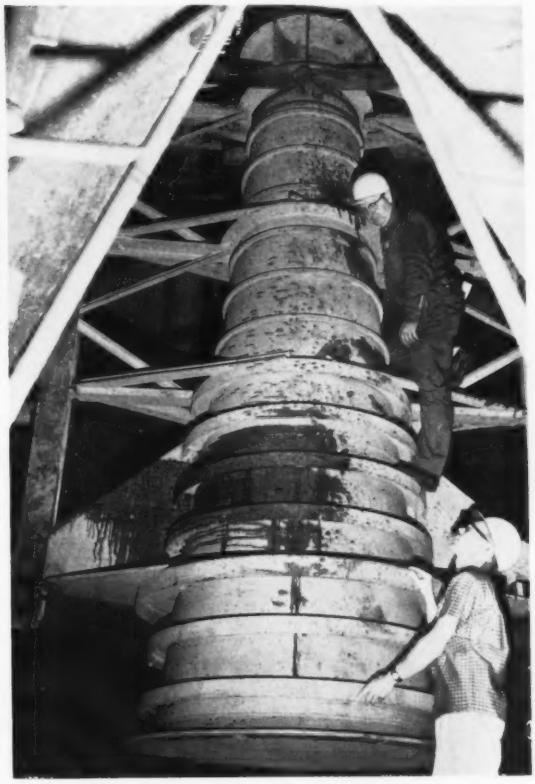


FIGURA 6 – *Guiadera cónica para tubo de sondeo. (Foto de la* National Science Foundation.)

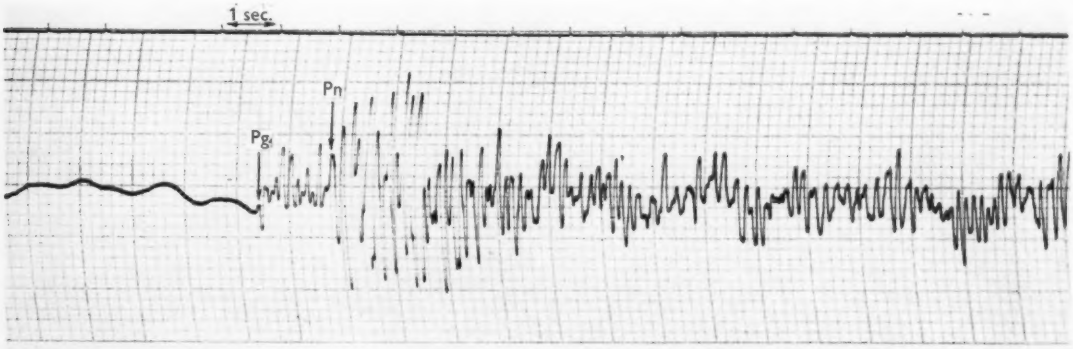


FIGURA 5 – *Sismograma obtenido a una distancia de 113 km de una explosión (approx. 500 kg de Torpex) en Loch Striven, cerca de Dunoon, por el grupo sísmico del* Atomic Energy Authority. *Pg es la llegada de la onda directa; Pn la de la onda refractada en la Moho.*

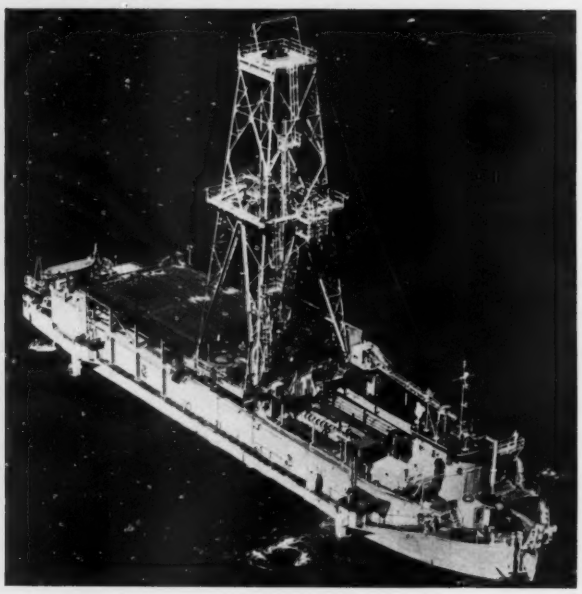


FIGURA 7 – CUSS 1.

FIGURA 8 – CUSS 1 *y flotador con reflector de radar.* (*Esta figura y la Fig.* 10 *se reproducen por cortesía de la* Global Marine Exploration Company.)

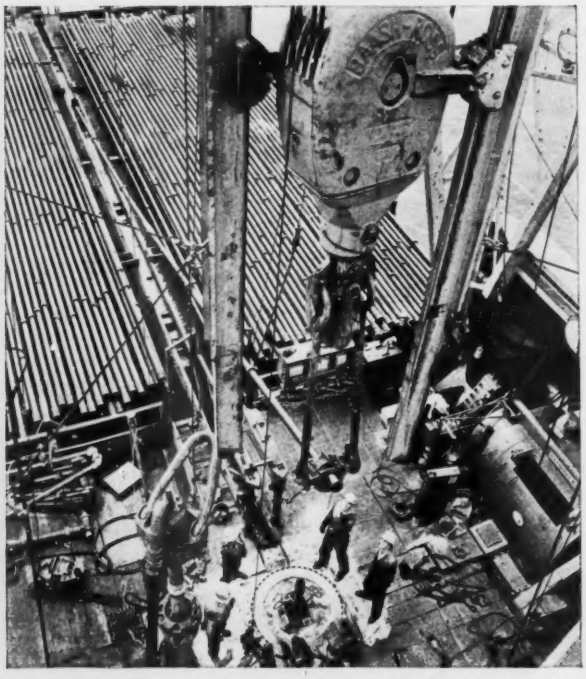


FIGURA 9 – *Elevación de un tubo de sondeo de* 18 *m de longitud.*

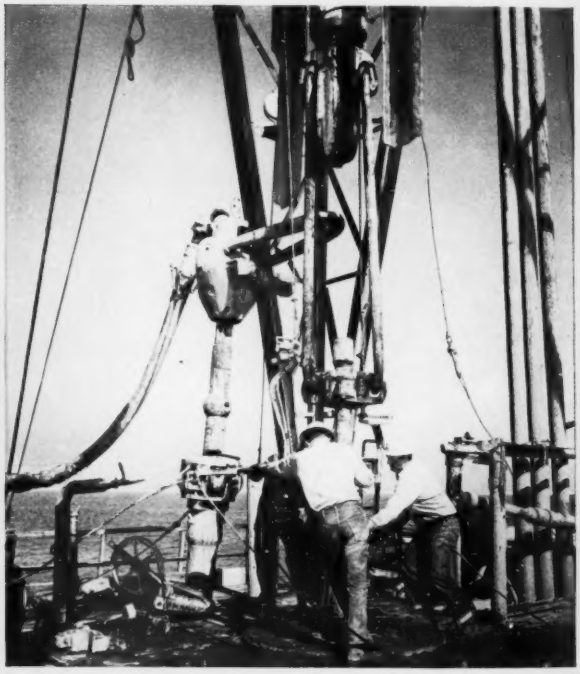


FIGURA 10 – *La mesa de rotación. El tubo de sondeo cuelga del polipastro, cuya parte inferior se ve en la parte superior de la fotografía. La instalación de bombeo del agua en el interior de la tubería de sondeo aparece a la izquierda de la fotografía.*

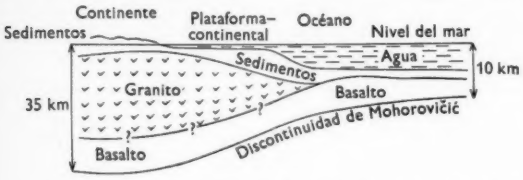


FIGURA 11 – *Sección aguas afuera de la costa oriental de los Estados Unidos.*

puesto de manifiesto la existencia de una discontinuidad similar a una profundidad aproximada de 5 km bajo el fondo del océano, es decir, alrededor de 10 km bajo la superficie del mar. Es difícil determinar la Moho en la zona de transición entre el continente y el océano. La región mejor estudiada es la de aguas afuera de la costa Este de los Estados Unidos [3], de la que la Fig. 11 muestra un corte esquemático. Es casi seguro que la Moho continental y oceánica se conectan en la forma que muestra esa figura. La velocidad bajo la discontinuidad oceánica normalmente no varía en más de 0,2 km/s de la velocidad media continental de 8,1 km/s.

Por encima de la discontinuidad, las rocas continentales parecen ser diferentes de las oceánicas. Bajo los sedimentos de los continentes yacen rocas semejantes a las que afloran en las áreas de los escudos antiguos tales como en el Canadá y Este de Africa. Estas rocas son típicamente granitos, gneises y esquistos, que probablemente representan las raíces de antiguas montañas arrasadas. La velocidad sísmica sobre la Moho aumenta frecuentemente con la profundidad, probablemente debido a un incremento en la proporción de rocas básicas. En algunos sitios pueden existir capas de rocas más básicas entre los granitos y la Moho. Bajo los océanos existe un espesor variable de sedimentos blandos, en los que las ondas sísmicas se propagan un poco más deprisa que en el agua. El espesor de este material oscila normalmente entre 0,1 y 1 km. Debajo se encuentra la «capa 2», con una velocidad sísmica de alrededor de 4,8 km/s y un espesor de unos 2 km. A los 3 km que existen entre ésta y la Moho se les denomina «capa 3», que da una velocidad sísmica de $6\frac{1}{2}$–7 km/s. Como existe una gran preponderancia de basalto entre las rocas ígneas océanicas, se supone que tanto la «capa 2» como la «capa 3» están constituídas por basalto.

La estructura representada en la Fig. 11 se basa principalmente en los resultados sísmicos y en las probabilidades petrológicas y está comprobada por medidas de la aceleración de la gravedad. Por termino medio, la gravedad al nivel del mar en un continente difiere en unas pocas millonésimas de la observada en el próximo océano a la misma latitud. De aquí se deduce que la masa para la unidad de área es la misma para los continentes que para los océanos. Ello sugiere que el material tiene una densidad mayor bajo la Moho que encima, y que la mayor cantidad de este material pesado bajo el océano está compensado por la ligereza del agua del mar en relación con las rocas superficiales de los continentes. La diferencia de densidad requerida es de alrededor de 0,5 g/cm^3, lo que indica una densidad aproximada de 3,2 g/cm^3 bajo la Moho. Esto es un ejemplo del principio de isostasia que sostiene que las estructuras topográficas de la Tierra flotan en equilibrio hidrostático de la misma manera que un iceberg flota en el mar. Esto es cierto, en líneas generales, para la mayor parte de las grandes estructuras, pero se aplica a promedios sobre áreas muy extensas más que a zonas concretas. La compensación de las irregularidades topográficas de las masas visibles parece conseguirse por variaciones en la profundidad de la Moho, y existe una estrecha correlación entre esta profundidad, la altura topográfica y la anomalía gravitatoria de Bouguer, como puede verse en la Fig. 12. (La anomalía de Bouguer representa la atracción o falta de atracción producida por diferencias ocultas de densidad, después de haber hecho las correcciones correspondientes a la topografía visible.)

EL MATERIAL BAJO LA MOHO

La discontinuidad de Mohorovičić parece ser una de las características más importantes de la

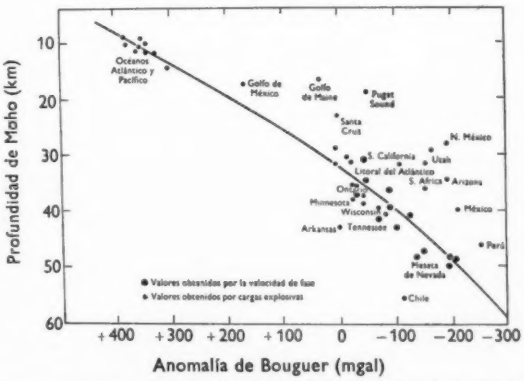


FIGURA 12 – *Correlación entre la profundidad de la Moho y la anomalía de Bouguer. Los resultados expresados por los puntos finos se obtuvieron por el método descrito en el texto; los de los puntos gruesos por un método que utiliza ondas de superficie de los terremotos (según Woollard* [6]).

Tierra. Se produce bajo todos los continentes y todos los océanos. Por encima de ella se encuentra la infinita variedad y complejidad geológica; pero por debajo, a juzgar por la constancia de las velocidades sísmicas, hay una uniformidad mucho más grande.

A pesar de su indudable importancia, se sabe muy poco de la Moho. Son conocidas las velocidades sísmicas por encima y por debajo, y tenemos algunas nociones sobre el salto de la densidad a través de ella, pero no sabemos si esto representa un contacto brusco entre dos materiales diferentes o si el cambio de uno a otro se extiende sobre una profundidad de algunos kilómetros.

La petrología nos da algunas indicaciones sobre la naturaleza del material. En distintas partes del mundo se encuentran rocas intrusivas que contienen minerales que sólo han podido formarse a altas presiones. Las mejor conocidas son las chimeneas con diamantes de Africa del Sur. Las relaciones de equilibrio entre el diamante y el grafito son ahora bien conocidas y está claro que los diamantes han tenido que formarse bajo la Moho. Por consiguiente, las rocas asociadas tienen que provenir también de grandes profundidades y deben representar una muestra más o menos contaminada del material de debajo de la Moho. Las rocas de las chimeneas con diamantes son complicadas mineralógicamente, pero están constituídas principalmente por silicatos de hierro y magnesio, en especial olivino, granate y enstatita. A base de éstas y otras rocas procedentes de grandes profundidades, se ha sugerido varias veces que el material de debajo de la Moho es peridotita, compuesta esencialmente de olivino, rico en magnesio $(Mg,Fe)_2SiO_4$, o eclogita, una roca compuesta de granates y piroxenos.

La comparación de las densidades y velocidades de la onda elástica de los materiales indicados con las propiedades de los que actualmente se encuentran bajo la Moho, se complica por los cambios observados en las estructuras cristalinas de muchos silicatos al llegar a las presiones y temperaturas de la Moho continental. En efecto, se ha pensado que la discontinuidad puede ser debida a cambios de fase en el basalto, sin ningún cambio en el material [2, 4]. Este es un punto de vista aceptable si se refiere a la Moho bajo los continentes, pero difícilmente puede ser correcta tal interpretación si se refiere a la infraoceánica. La presión en este último caso es sólo de unos 1800 kg/cm^2 y la temperatura 120° C; no parece probable una reorganización completa de la red del silicato. Si, como parece probable, las Mohos oceánica y continental son continuas, es posible que la continental no sea tampoco debida a un cambio de fase. Lo que cabe esperar es que el material que se encuentra debajo de la Moho sea distinto del de encima.

EL PROYECTO MOHOLE

Evidentemente hay muchas teorías posibles, y es muy improbable que mediante experiencias de laboratorio o por observaciones hechas en la superficie de la Tierra pueda determinarse la naturaleza del material existente bajo la Moho. La solución más satisfactoria es sin duda ejecutar un sondeo y tomar muestras. El sondeo más profundo realizado hasta ahora, ha alcanzado una profundidad de 7,7 km y no parece probable que las técnicas se perfeccionen lo suficiente para llegar hasta la profundidad de 35 km, que es la que se necesitaría para alcanzar la Moho en los continentes. En el mar, donde la Moho se encuentra bajo 5 km de agua y 5 km de sedimentos, el proyecto parece más factible, aunque todavía existen formidables dificultades. El actual intento de sondear hasta la Moho se debe a una propuesta presentada por H. Hess y W. Munk a la *American Miscellaneous Society* (AMSOC) en 1957. La Sociedad nombró un «comité de sondeos profundos», con G. Lill como Presidente, para considerar la posibilidad de sondear hasta la Moho. En septiembre del mismo año se celebró en Toronto la reunión trienal de la Unión Internacional de Geología y Geofísica, y aunque esta cuestión no se incluyó en su Orden del Día, hubo muchas conversaciones privadas sobre este tema. A pesar de un considerable escepticismo, se persuadió a las Asociaciones de Oceanografía y Sismología para que adoptasen resoluciones apoyando el proyecto.

El comité de sondeos profundos, recibió una pequeña subvención de la *National Science Foundation* para estudiar los medios y procedimientos de resolver el problema. W. Bascom, a quien se designó como director del proyecto, ha reclutado el equipo necesario y obtenido la ayuda de los contratistas de sondeos, compañías petrolíferas y arquitectos navales. El sondeo recibió el nombre de *Mohole* que es una abreviatura de «sondeo (*hole*) para alcanzar la discontinuidad de Mohorovičić».

Al estudiar las dificultades que presentaba el proyecto se tuvieron en cuenta las cuatro cuestiones principales siguientes:

1. ¿Cómo puede mantenerse un barco a la distancia máxima de cien metros de un punto dado, en mar abierto?
2. ¿Cómo pueden manipularse en el mar 10 km

de varillas de sondeo y utilizarse para realizar sondeos hasta una profundidad bajo la superficie del mar mayor que la máxima alcanzada en tierra?

3. ¿Cómo puede volverse a introducir la barrena en el sondeo después de haberla retirado para cambiar un trépano?
4. ¿Dónde debería realizarse el sondeo?

PERFORACION EN MAR PROFUNDO

El primer paso era obtener la suficiente experiencia que permitiera conocer claramente las dificultades con que se había de tropezar, y demostrar la factibilidad del proyecto, ejecutando sondeos cortos en el fondo de un mar profundo. Esto se realizó en abril de 1961. La mayor parte de los sondeos realizados en aguas someras lo han sido con castilletes montados sobre plataformas apoyadas en el fondo del mar. Este método no puede usarse en alta mar, donde generalmente se tiene una profundidad de 3½ a 6 km. Con tales profundidades es necesario operar desde una plataforma flotante. Se han montado máquinas de sondeo sobre diferentes clases de barcos y barcazas, y se han podido utilizar con éxito en el mar, particularmente en las costas de California. Para los ensayos preliminares del Mohole, el Comité de la AMSOC ha elegido la barcaza *CUSS* 1, cuyo nombre está formado con las letras iniciales de los nombres de las compañías petrolíferas propietarias, Continental, Unión, Shell y Superior.

CUSS 1, es una barcaza de carga transformada, de 19 m de eslora, 15 de manga y 4,6 de calado en carga. Soporta una torre de 30 m de altura y sondea a través de un orificio perforado en el centro del casco (Figs. 7 y 8). El sondeo de ensayo se perforó entre la isla de Guadalupe y la costa oeste de México, en un punto situado a unos 74 km de la isla y 220 km de la costa (117°30′ O, 29° 0′ N), y la profundidad del agua era de 3760 m.

Mientras se sondeaba en el lugar de ensayo, había 3700 m de tubería de sondeo entre *CUSS* 1 y el fondo del mar. Si el barco cambia de posición y el desplazamiento es muy grande, la tubería se dobla y puede romperse. No se conoce la deriva necesaria para romperse el tubo, pero se supone, según los cálculos y la experiencia en aguas poco profundas, que es del orden de 200 m. Por lo tanto es conveniente mantener el barco dentro de un límite de deriva de unos 60 m respecto a la vertical del punto de sondeo. Es impracticable o en todo caso sumamente caro anclar con tanta precisión un barco grande en aguas profundas; las presiones variables del viento y las corrientes, tensarían unos cables de áncora y aflojarían otros, lo que daría lugar a que el barco se desplazara algunos centenares de metros de manera imprevisible. Por consiguiente se decidió mantener la barcaza en posición sin amarras, maniobrándola por medio de cuatro hélices, una en cada ángulo. Cada una de estas hélices puede orientarse alrededor de un eje vertical, de modo que puede ejercer su empuje en cualquier dirección. La combinación de las cuatro permite al barco moverse hacia adelante, hacia atrás, de costado o girar.

Estos dispositivos proporcionaban un control muy exacto de la posición y orientación del barco. Las señales utilizadas como puntos de referencia para mantener estacionario el barco, consistían en un círculo de flotadores sujetos a unas boyas ancladas y sumergidas a 50 m bajo la superficie (Fig. 13). Una boya adecuada a tal fin puede ser anclada por medio de un cable de acero de 6 mm que se mantendrá en posición muy próxima a la vertical. El flotador de superficie (Fig. 8) está sujeto sólo a pequeñas fuerzas de viento y corrientes y puede mantenerse dentro de los 30 m de distancia de la vertical de su punto de anclaje. La posición del barco dentro del anillo de boyas se determina por radar y por un método acústico. Cada flotador lleva un reflector de radar, que permite señalar su posición relativa al barco en un cuadro indicador visible por el piloto. Se obtiene una disposición similar con un sistema acústico usando *transponders* (emisoras de sonidos) unidos a las boyas. De este modo se dispone de dos métodos independientes para determinar la posición del barco, con un grado de precisión mayor de la requerida. Todo el sistema funcionó muy bien, y el barco se mantuvo dentro de los 60 m de la posición predeterminada, durante muchos días, a pesar de soportar vientos de 60 km/h y olas de 4 m.

El ensayo de sondeo fue realizado con trépanos de diamante con un orificio central. Para la mayor parte del sondeo se fijaron a una tubería de tipo normal, colocando el trépano en el extremo del varillaje de sondeo de 14 cm de diámetro, constituído por piezas de 9 m de longitud, atornilladas unas a otras. Estos tubos fueron estibados por porciones de 18 m de longitud y se elevaban con un polipastro a medida que eran necesitados. Este polipastro estaba conducido por unas guiaderas (Fig. 9); tal disposición es necesaria en el mar para impedir la oscilación del mecanismo de un lado a otro, cuando el barco se balancea.

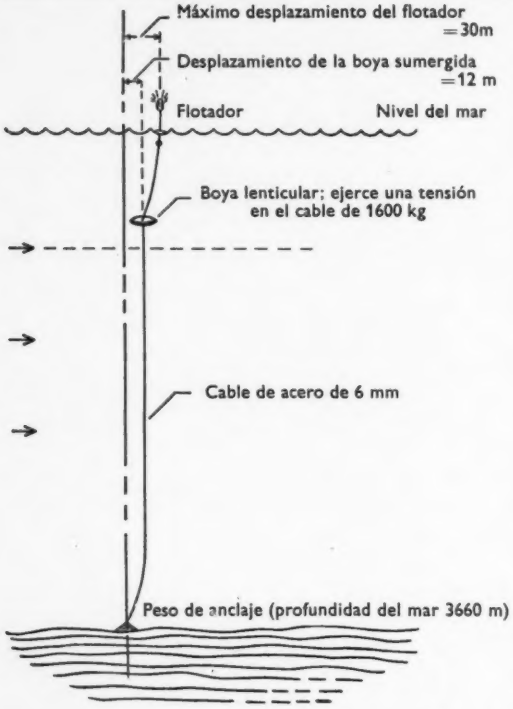


FIGURA 13 – *Una boya. (Esta figura y la Fig. 14 se reproducen por cortesía de Weidenfeld and Nicolson Ltd, editores en la Gran Bretaña de «A Hole in the Bottom of the Sea» por W. Bascom* [1].)

Cuando el barco se balancea o inclina, la tubería de sondeo se curva. Los cálculos muestran que las máximas tensiones se producen cerca de la superficie y que, si no se tomasen precauciones, el máximo balanceo e inclinación admisible sería $\frac{1}{2}°$, límite que sería ya sobrepasado en tiempo totalmente tranquilo. Esta dificultad fue vencida colocando una guiadera cónica alrededor de los 16 m superiores de tubería (Figs. 6 y 14). La guiadera da lugar a que la flexión cerca del extremo superior de la tubería se reparta sobre una mayor longitud (Fig. 14). Con la guiadera puede tolerarse una oscilación de $6\frac{1}{2}°$.

Inyectando con una bomba agua del mar en la tubería de sondeo para salir por el trépano y subir de nuevo por el taladro hasta salir a nivel del mar se han podido extraer partículas de roca del fondo del sondeo. La disposición en la extremidad superior de la tubería puede verse en la Fig. 10. El trépano perfora un cilindro hueco de roca, dejando un testigo cilíndrico en un tubo situado en el eje del trépano. Este tubo y el testigo de roca que contiene pueden extraerse por dentro de la tubería de sondeo izándolos con un cable (*sandline*). El tubo puede volver a situarse en el fondo, háciéndolo descender por la presión del agua bombeada en el interior de la tubería de sondeo. De esta forma es posible obtener muchos testigos sin tener que retirar la tubería de sondeo y el trépano. Cuando éste se desgasta, o algún accidente impide continuar el avance, hay que abandonar el taladro y comenzar uno nuevo. Pero para realizar sondeos profundos sería necesario poder volver a introducir en el taladro un nuevo trépano.

RESULTADOS DE LOS SONDEOS DE ENSAYO

Se perforaron tres sondeos muy próximos en el emplazamiento señalado cerca de la isla de Guadalupe. El fin primordial de ello era perfeccionar los métodos de sondeo en aguas profundas, encontrar en qué consisten las dificultades y establecer la posibilidad de llegar a mayor profundidad. De esos sondeos se obtuvo importante información científica. Se observó que los sedimentos tenían un espesor de 180 m y que bajo ellos se encontraba el basalto. Este espesor está de acuerdo con las medidas obtenidas con explosiones sismológicas y el hallazgo del basalto no es una sorpresa porque es, con mucho, la roca ígnea más frecuente en los océanos y constituye el gran promontorio volcánico de la isla de Guadalupe, distante sólo 74 km. La cosa más sorprendente es que la totalidad de los 180 m de sedimentos parecen pertenecer al Mioceno, aunque en el momento de escribir estas líneas, sólo se había efectuado un examen preliminar de los testigos. Es virtualmente cierto que el mar cubrió esta zona

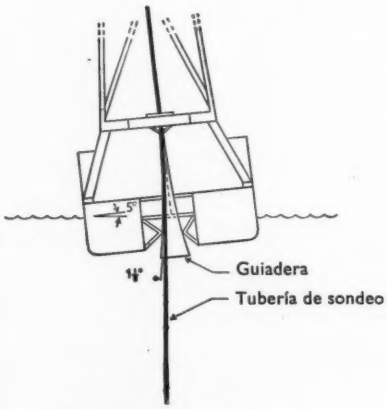


FIGURA 14 – *Efecto del balanceo sobre un tubo de sondeo con guiadera cónica.*

mucho antes del Mioceno, y realmente no hay razón para suponer que ésta no haya sido un área oceánica durante todos los tiempos pasados. Parece sumamente improbable que el Mioceno sea el único período durante el que se depositaron sedimentos y por lo tanto hemos de suponer que existen otros sedimentos ocultos bajo los basaltos del Pacífico. En esto no hay nada inverosímil ni sorprendente; anteriormente no se tenía prueba de ello, pero esto simplifica el problema planteado por el pequeño espesor de sedimentos poco consolidados encontrado en todo el mundo gracias al método sísmico. Podemos, pues, suponer ahora que la mayor parte del material existente entre la Moho y el fondo del océano debe estar constituído por sedimentos alternantes con basalto. Se estima normalmente que la duración del período Mioceno es de 14 millones de años; los sedimentos atravesados representan menos de la totalidad del período. Si se supone que se han depositado en 5 millones de años, la velocidad de sedimentación será 4 cm/1000 años, lo que representa varias veces la velocidad media determinada mediante los sondeos cortos. Por qué los sedimentos han podido acumularse rápidamente en este punto durante el Mioceno y muy lentamente o faltar por completo en un pasado reciente, es una incógnita.

La roca que existe bajo los sedimentos es un basalto cristalino de aspecto fresco, con uno o dos milímetros de espejo en su superficie. Por cuanto hemos podido ver, no existen sedimentos metamorfizados unidos al basalto; por consiguiente hay que suponer que éste ha fluído sobre el fondo del océano y no se ha introducido como «sill» entre sedimentos preexistentes. El basalto se perforó en un espesor de 15 m y se obtuvo una buena cantidad de testigos. Se espera con interés el resultado del examen de este material. Probablemente podrá determinarse su edad, así como también su composición química y propiedades físicas.

Las mediciones de temperatura efectuadas en uno de los taladros dieron un flujo de calor aproximadamente doble de la media en los océanos, pero este alto valor está de acuerdo con las medidas hechas en las proximidades con sondas pequeñas. Estos resultados proporcionan una confirmación muy necesaria de los proporcionados por las pequeñas sondas, pues a pesar del cuidado con que se han investigado los posibles errores en aquéllas no ha sido posible alcanzar la absoluta certeza de que las medidas tomadas en profundidad aproximadamente de metro en metro dieran gradientes de temperatura representativos.

PROBLEMAS PARA EL FUTURO

Después del éxito alcanzado con los sondeos de ensayo, el trabajo futuro deberá orientarse en dos sentidos. En primer lugar, con la técnica actual o con pequeños perfeccionamientos de ella y con barcos del tamaño de *CUSS* 1, se puede sin duda perforar taladros hasta de 300 m en los materiales existentes en la mayor parte del fondo del océano, Se abre así la posibilidad de estudiar con detalle los sedimentos y lavas hasta esta profundidad y seguir la historia de los océanos durante un considerable período de tiempo, de la misma manera que se ha hecho en tierra. Esto conduciría a resolver en pocos años algunos de los más importantes problemas de la geología. También sería posible demostrar, sin dejar lugar a dudas, si las masas de tierra que se supone han existido más allá de muchas costas continentales se han sumergido en los océanos actuales; nosotros creemos que no se encontrarán tales continentes sumergidos. Sería también posible determinar la edad de cada cuenca oceánica y, por los cambios en los sedimentos, estudiar cambios acaecidos en la distribución de tierras y mares, así como variaciones de clima y de las corrientes marinas. El costo de este programa no sería elevado. El de *CUSS* 1 es de unos tres millones de dólares y el sostenimiento de un barco de este tipo probablemente podría costar algo menos de un millón de dólares al año. Parece aconsejable construir por lo menos un barco de este tipo en vez de uno o más de los nuevos barcos oceanográficos convencionales propuestos.

El otro sentido en que podrán orientarse los estudios será el intento de alcanzar la Moho. Puesto que un sondeo tan profundo no podría ser realizado con un solo trépano, será necesario retirar el varillaje del sondeo con el trépano y volver a introducir aquel con un trépano nuevo. Esta operación no se ha ensayado todavía en aguas profundas. Para ello existen al menos dos métodos. Se puede tender un par de cables desde el barco hasta el fondo con una barra horizontal entre los dos cables. Si el extremo inferior del varillaje se sujeta al centro de esta barra podría deslizarse hacia el fondo y los cables dirigirían al trépano hasta el taladro. Este método ha sido utilizado en aguas poco profundas. Si se utilizara en aguas profundas existe el riesgo de que se enredaran los cables y el varillaje. Además no sería posible el retorno hasta el barco del líquido bombeado en el taladro; el líquido que habría que emplear para el sondeo tendría que ser agua del mar, lo mismo que en los sondeos de ensayo. En

las perforaciones realizadas en tierra firme se usa normalmente como líquido un lodo denso, y constituye una grave desventaja no poder operar de la misma manera en el sondeo proyectado en el fondo del mar. El lodo tiene varias finalidades en el sondeo: se adhiere a las paredes del taladro e impide el desmoronamiento de éste. Si el lodo tiene una elevada densidad, evita que el agua o el petróleo del terreno se abran camino violentamente hacia arriba y salgan por el taladro; también impide que los detritos caigan al fondo sobre el trépano, cuando se para la circulación de los lodos.

No parece prudente adoptar un método que no permita establecer la circulación de lodos y sería una gran ventaja instalar una tubería entre el fondo del mar y el barco, dentro de la cual pueda girar el varillaje y al mismo tiempo subir por ella los lodos. Para ello sería necesario sostener esta tubería por medio de flotadores sumergidos, de tal modo que el barco pueda desprenderse de ella en caso de temporal o cualquier otra eventualidad, y más tarde volver a conectarla. Para transportar e instalar una tubería tal se necesitaría un barco mucho mayor que el *CUSS* 1. Durante los ensayos preliminares se instaló un prototipo de soporte de fondo para esta tubería en las aguas relativamente poco profundas de la costa de San Diego, pero aún no se han hecho ensayos en aguas profundas. El manejo, empalme y sujeción de un material tan pesado y engorroso como es una tubería de unos 30 cm de diámetro y 4000 m de longitud, ofrecen considerables dificultades, y es muy probable que se necesite realizar nuevos ensayos antes de intentar un sondeo hasta la Moho. Parece que ofrecería una gran ventaja utilizar una turbosonda con corona de diamantes para un sondeo muy profundo y probablemente sea ésta la que se emplee.

Todavía no se ha señalado emplazamiento para el primer Mohole, pero en todo caso debe ser un fondo oceánico «típico» en su más amplio significado. La Moho deberá ser lo más somera posible y el flujo de calor no debe ser demasiado alto, aunque probablemente no sea necesario buscar un sitio en donde sea especialmente bajo. El clima en el emplazamiento elegido debe ser bueno durante una gran cantidad de días en todas las estaciones y este emplazamiento no debe quedar demasiado lejos de las fuentes de suministro del equipo ni de un puerto conveniente en el que la tripulación pueda pasar sus días de descanso.

Por razones de clima hay que excluir el Atlántico y el Pacífico al Norte del Paralelo 40°, así como las áreas de los vientos alisios y la zona de huracanes. El flujo de calor en las costas del Pacífico, al Sur de California y en México, es más alto de lo deseable, pero el buen tiempo y las ventajas de su situación, hacen muy posible la elección de un emplazamiento en algún punto de esa zona.

Es muy difícil calcular el costo, pero es probable que antes de terminar el primer sondeo se hayan gastado unos quince millones de dólares; en todo caso no parece que el costo total exceda del doble de esta cifra.

RESULTADOS QUE SE PUEDEN ESPERAR

Uno o varios sondeos que llegasen a penetrar por debajo de la Moho permitirían resolver muchas incógnitas. Demostrarían si la Moho es un límite entre dos tipos de roca o si es una zona en la que se produce un cambio en la estructura cristalina. Se podría determinar la velocidad de generación de calor por radiactividad en la corteza terrestre, con lo que se limitaría mucho, en relación con nuestros actuales conocimientos, la amplitud de variación de la distribución de la temperatura en el interior de la Tierra. En particular si se viera que el material bajo la Moho se parecía en composición química y radiactividad a los meteoritos, se podría establecer con bastante precisión la historia térmica de la Tierra.

AGRADECIMIENTO

AMSOC y el Dr. Bascom me autorizaron a visitar el pasado mes de abril el sondeo de ensayo de la isla de Guadalupe. El ordenado caos que vi allí me impresionó profundamente, no sólo desde el punto de vista del proyecto científico, sino como aventura cooperativa entre muy diferentes clases de gentes: marineros, sondeadores, océanografos e ingenieros, entre otros. Sin tal visita probablemente no hubiera escrito este artículo. También debo agradecimiento al nuevo libro del Dr. Bascom [1] por su abundante información.

REFERENCIAS

[1] Bascom, W. «A hole in the bottom of the sea». Doubleday, Nueva York. 1961.

[2] Fermor, L. L. *Spec. Publ. Indian Ass. Cult. Sci.*, No. 6, 1938.

[3] Heezen, B. C., Tharp, M. y Ewing, M. *Spec. Pap. geol. Soc. Amer.*, No. 65, 1959.

[4] Lovering, J. F. *Trans. Amer. geophys. Un.*, **39**, 947, 1958.

[5] Mohorovičić, A. *J. met. Obs. Zagreb*, **9**, Parte 4, Sección 1, 3, 1909.

[6] Woollard, G. P. *J. geophys. Res.*, **64**, 1521, 1959.

Los cuantos de luz y la visión

M. H. PIRENNE

La sensibilidad del ojo humano es tan grande que puede ser estimulado por muy pocos cuantos de luz. A iluminaciones cerca del umbral de visión, las propiedades cuánticas de la luz tienen consecuencias importantes; son también importantes en la teoría general de los procesos visuales. Este artículo estudia algunos de los fenómenos importantes y su interpretación teórica. Considera también la actividad retinal que ocurre en la oscuridad total y las respuestas nerviosas que ocurren cuando se suprime la luz de la retina.

Considerada como un detector de radiación electromagnética la retina humana tiene un intervalo de sensibilidad a longitudes de onda muy limitado: el intervalo visible dentro del espectro. Dentro de este intervalo la sensibilidad retinal[1] depende mucho de la longitud de onda (Fig. 2). La sensibilidad es máxima cuando se utiliza una longitud de onda de unos 500 mμ en condiciones tales que la vision se produce por medio del sistema de bastoncitos que se encuentra en la periferia de la retina. El número de cuantos que actúan directamente sobre los bastoncitos retinales receptores y los estimulan es a menudo tan pequeño que las propiedades cuánticas de la radiación han de tomarse explícitamente en cuenta en la teoría de los procesos visuales, especialmente al considerar las fluctuaciones puramente físicas que ocurren en los estímulos luminosos mismos.

Toda la evidencia disponible indica que la disminución de la sensibilidad de los bastoncitos para longitudes de onda más cortas o largas que 500 mμ es debida a que la sustancia fotosensible contenida en ellos (rodopsina o púrpura visual) absorbe proporcionalmente menos luz de esas longitudes de onda. Así pues, el número de cuantos capturados por los bastoncitos o que pueden actuar sobre ellos es muy pequeño cuando se utiliza luz monocromática de longitud de onda diferente de 500 mμ y cuando se utiliza luz con amplia distribución espectral, como la luz blanca. Así, cuando se investiga la cantidad mínima de luz suficiente para visión con bastoncitos se encuentra que se necesita como un millón de veces más cuantos que incidan en la retina para luz de 720 mμ que para luz de 500 mμ.

Los experimentos muestran que la cantidad mínima de energía luminosa suficiente para una respuesta visual es más pequeña en el caso de un relámpago breve de luz de unos 507 mμ observado por visión periférica, después de que el ojo ya se ha adaptado plenamente a la oscuridad. El contenido energético de tal relámpago es de unos 100 cuantos, medido en la córnea, y representa la cantidad media de energía que entra en el ojo. Ha de notarse que el cuanto es utilizado aquí sólo como una unidad conveniente de energía, puesto que las propiedades cuánticas de la luz sólo entran en juego cuando ésta es absorbida, y que es imposible localizar cuantos en un flujo de energía radiante. Se expresarán a veces valores medios de energía en números fraccionarios de cuantos aunque, naturalmente, el número de cuantos absorbidos es siempre entero. El número medio de cuantos absorbidos por los bastoncitos en estos experimentos es de unos diez; puede posiblemente ser menos pero siempre excede a la unidad. Estos cuantos están distribuídos entre un cierto número de bastoncitos (algunos centenares para un campo visual que abarque un ángulo de 10′ de arco en el ojo (Fig. 3)). Es imposible, aunque sólo sea por la difracción que ocurre en la pupila, limitar el estímulo a un solo bastoncito.

La capacidad del ojo para responder a la absorción de muy pocos cuantos por medio de los receptores retinales es de importancia práctica en la vida diaria. Por ejemplo, si nos despertamos en una noche muy oscura y miramos a la ventana de nuestro dormitorio podemos distinguir detalles en contraste sobre la parte más luminosa formada por el cielo. Si después de un minuto o dos cerramos de nuevo los ojos, nuestras retinas no habrán absorbido durante toda la operación suficiente luz para hacer que cada célula receptora haya recibido un solo cuanto luminoso. De una

[1] Sensibilidad espectral significa la recíproca de la cantidad umbral de luz, que se define por $W_\lambda \tau_\lambda / h\nu$, donde W_λ es la energía umbral medida en la córnea, τ es el factor de transmisión de los medios oculares y $h\nu$ es el cuanto de energía. Esta es la sensibilidad retinal en una base cuántica. La sensibilidad medida en la córnea del ojo en una base energética es $1/W_\lambda$: para los bastoncitos es máxima a 507 mμ [31, 32] en vez de cerca de 500 mμ.

forma más general podemos ver bastante bien en noches oscuras para encontrar nuestro camino, incluso aunque al nivel de iluminación existente la mayoría de nuestras células retinales receptoras permanecen completamente sin estimular y la sustancia sensible que contienen sin absorber luz alguna. Sólo a niveles de iluminación correspondientes a la luna llena es la intensidad suficiente para hacer que cada bastoncito absorba varios cuantos por segundo.

LOS SISTEMAS DE CONOS Y BASTONCITOS EN LA VISION HUMANA

La retina contiene dos tipos de células receptoras, los conos y los bastoncitos (Figs. 3 y 4). El sistema de bastoncitos es activo principalmente en la visión nocturna y en aquellas condiciones en que el ojo responde a iluminaciones bajas, a las que ya se ha adaptado completamente. Después de la estimulación por luz diurna brillante, se necesita al menos media hora para que el ojo se adapte completamente a la oscuridad.

Ya se han descrito algunas propiedades de los bastoncitos. El pigmento fotosensible (rodopsina) está contenido en los segmentos terminales de los bastoncitos (*b* en la Fig. 4). Tiene un color rosa porque absorbe más fuertemente en la región azul-verde y transmite el extremo rojo del espectro casi enteramente; la sensibilidad de un bastoncito (Fig. 2, curva 1) es paralela a la absorción de la rodopsina en la gama en que puede medirse dicha absorción [33]. En el caso de retinas humanas adaptadas a la oscuridad o en animales tales como la rana (en estado fresco) puede verse fácilmente ese color rosado en el microscopio con iluminaciones bajas. Bajo iluminaciones fuertes el color desaparece rápidamente pues la rodopsina es blanqueada por la luz. Es posible preparar extractos acuosos de rodopsina a partir de retinas y se han estudiado extensamente sus propiedades *in vitro*.

Sólo los cuantos absorbidos por la sustancia fotosensible pueden afectarla; no pueden absorberse fracciones de cuanto. Este último y fundamental hecho facilita a menudo el estudio de la acción de estímulos luminosos sobre la retina. Por ejemplo, cuando la cantidad de energía absorbida corresponde a un número de cuantos pequeño respecto al número de receptores en función, se sigue que algunos de los receptores habrán absorbido uno o varios cuantos, mientras que otros no habrán absorbido luz alguna. No es muy seguro que todos los cuantos así absorbidos sean «cuantos activos» en el sentido de que lleven a una excitación nerviosa de las células receptoras; pero, de todos modos, el número de cuantos activos sólo puede ser igual o menor que el número de cuantos absorbidos. Se acepta generalmente que lo que importa en la estimulación de los bastoncitos es el número de cuantos de luz que activan los bastoncitos, no la energía de los cuantos individuales.

El sistema de conos del ojo es activo en luz diurna normal, dándonos la visión detallada y coloreada. A causa del reflejo de fijación utilizamos visión directa o foveal para mirar a un punto de un objecto que atrae nuestra atención. El centro de la *fovea centralis* de la retina sólo contiene conos (Fig. 1). Queda ciego a bajos niveles de iluminación en los que el sistema de bastoncitos, que sólo está presente en la periferia de la retina, todavía puede actuar. Esta es la razón por la que a pesar del reflejo de fijación debemos mirar «con el rabillo del ojo» para ver mejor de noche. Esta sensibilidad más baja del sistema de conos de la fóvea es debido en parte a la menor capacidad para sumar estímulos luminosos en espacio y en tiempo; esto, a su vez, da a la fóvea una precisión de visión mayor que la de la periferia. Incluso cuando se utilizan estímulos pequeños y breves, el número mínimo de cuantos necesarios para ver, medido en la pupila, es mucho mayor para la fóvea que para la periferia. El sistema foveal de conos, considerado en conjunto, tiene su máxima sensibilidad cerca de 555 mμ. Contiene varios mecanismos de conos con diferentes sensibilidades espectrales [3]. Los conos individuales mismos difieren en sus propiedades y muy probablemente contienen diferentes pigmentos sensibles [4]. Se conoce bastante menos acerca de los pigmentos de los conos que de la rodopsina [5], especialmente en lo que se refiere a la cantidad de luz que absorben *in situ*.

En el centro de la fóvea sólo hay conos, pero en todas las demás regiones de la retina existen conos y bastoncitos; sin embargo, en la periferia los bastoncitos son mucho más numerosos que los conos. Excepto en el caso de longitudes de onda largas en el extremo rojo del espectro, la visión con la periferia adaptada a la oscuridad, a intensidades muy bajas, se realiza sólo por el sistema de bastoncitos. Esto se ha demostrado en experimentos que utilizan la «sensibilidad direccional de la retina» (efecto de Stiles-Crawford [5–7]) que es casi exlusivamente una propiedad de los conos, no de los bastoncitos (Fig. 5). A grandes rasgos, los conos son estimulados mucho

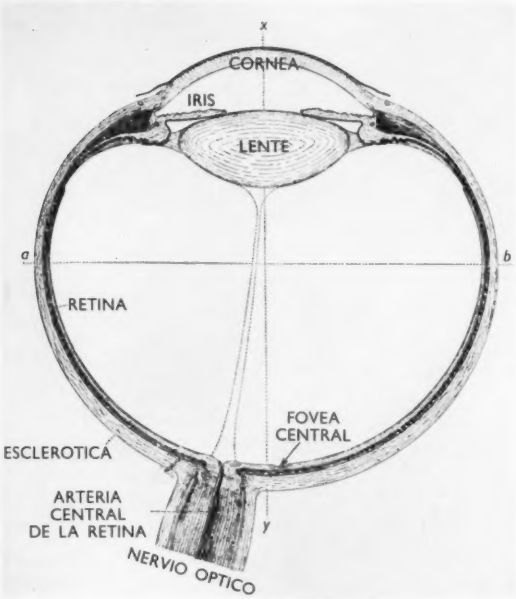


FIGURA 1 – *Sección de un ojo humano adulto. La fóvea central es una depresión de la retina de una fracción de milímetro de diámetro solamente, situada cerca del eje óptico* xy *del ojo. Su centro contiene sólo conos. El resto de la retina contiene bastoncitos y conos* (×3). (*Según E. A. Schäfer, «Quain's Elements of Anatomy», Vol.* III, *Parte* III, *Londres*, 1894.)

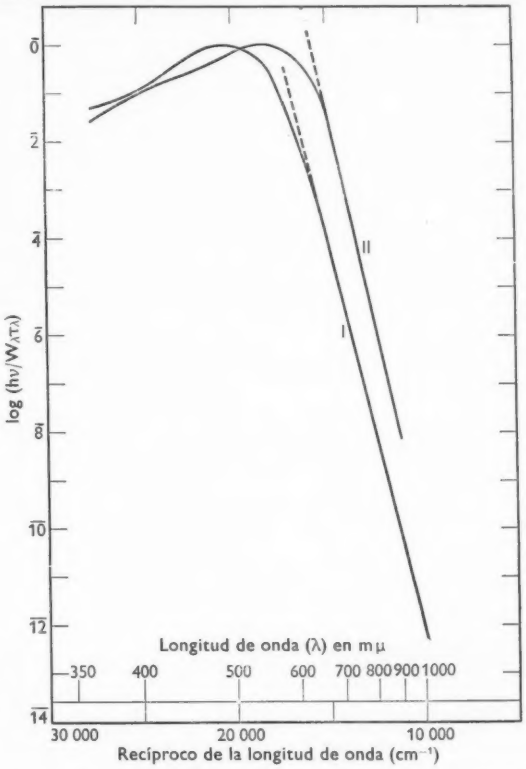


FIGURA 2 – *Sensibilidad espectral relativa de los sistemas de conos y bastoncitos humanos. Curva I, visión parafoveal con bastoncitos. Curva II, visión foveal con conos. Los valores máximos de las curvas de sensibilidad para los conos y para los bastoncitos han sido igualados arbitrariamente; su separación en la escala vertical varía con las condiciones experimentales.* (*Según W. S. Stiles* [1].)

menos por rayos que inciden oblicuamente sobre la retina, mientras que el estímulo de los bastoncitos, en general, es casi independiente de la dirección de la luz incidente, dentro del intervalo de direcciones que pueden obtenerse utilizando la pupila natural. La luz rojo oscuro estimula a menudo los conos periféricos, adaptados a la oscuridad, así como los bastoncitos; pero mediante el uso de un rayo estrecho de luz roja de intensidad adecuada que entre a través del borde de la pupila puede restringirse el estímulo a los bastoncitos. Supongase que en la Fig. 5 los rayos rojos X e Y, de igual intensidad, inciden sobre la retina adaptada a la oscuridad en el mismo punto Q, que contiene conos y bastoncitos. X e Y estimulan a éstos casi igualmente. A intensidades bastante altas, el rayo Y, como incide normalmente sobre la retina, estimula más a los conos que X, que incide oblicuamente. La intensidad puede reducirse de tal forma que mientras Y estimule a conos y bastoncitos X estimule sólo a los últimos. Si se hace que un rayo fino de luz roja entre en el ojo moviéndose a lo largo de un diámetro de la pupila expandida, la fuente «roja» es vista al principio casi incolora, blancuzca o grisácea,

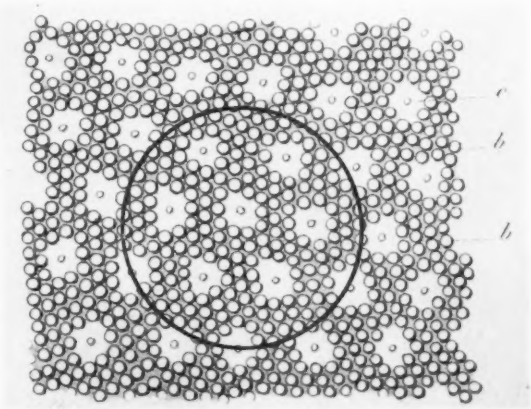


FIGURA 3 – *El mosaico de bastoncitos* (b) *y de conos* (c) *en la periferia de la retina humana* [2]. (×750) (*Según M. Schultze*, 1866.) *El círculo grande representa la imagen geométrica, de* 48,5 *micras de diámetro, de un campo que subtienda un ángulo visual de* 10′ *de arco.*

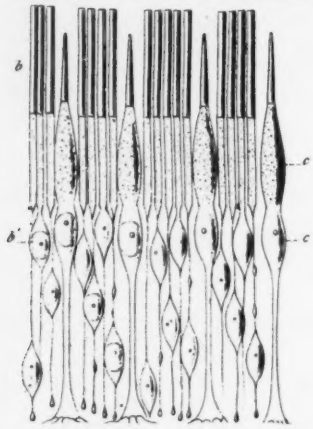


FIGURA 4 – *Sección transversal de la capa de bastoncitos* (b) *y de conos* (c) *de la periferia de la retina humana. La luz procedente de la pupila pasa a través de la retina y alcanza finalmente la rodopsina contenida en los segmentos terminales de los bastoncitos* (b), *dibujados más oscuros en la figura* (×500). (*Según M. Schultze*, 1866 [2].)

después roja y finalmente incolora de nuevo. Es decir, cuando entra por la periferia de la pupila la luz de ondas largas produce casi la misma sensación incolora que la luz de otras regiones del espectro cuando entra por la periferia o por el centro. La sensibilidad espectral relativa es también la misma para la entrada periférica o central en todo el espectro, excepto la región roja [8]. El color rojo que se ve a menudo en la periferia adaptada a la oscuridad en el caso de un estímulo luminoso de ondas largas y de intensidad suficiente ha de ser pues atribuído a la acción de los conos. Cuando se estimula el sistema de bastoncitos de un modo aislado aquél es incapaz de diferenciar entre las diferentes longitudes de onda, resultado que, entre otras cosas, apoya la opinión de que, dentro del espectro visible, todos los cuantos activos causan una estimulación nerviosa de la misma especie en los bastoncitos, independientemente de la energía de cada cuanto. Todo esto está relacionado con la conocida observación que en una noche oscura es imposible distinguir los colores de los objetos. Los objetos rojos no parecen rojos o grises, sino negros, porque no reflejan suficiente luz para estimular los conos o los bastoncitos.

SENSIBILIDAD DE LOS BASTONCITOS

Una de las ilustraciones más simples de la sensibilidad del sistema de bastoncitos viene dada por el umbral absoluto del ojo para un campo grande iluminado que emita una banda de

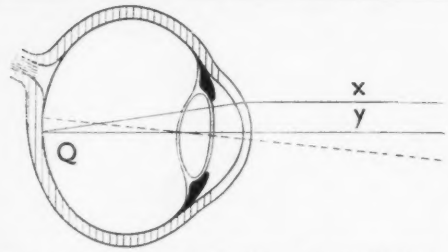


FIGURA 5 – *Diagrama ilustrativo de la sensibilidad direccional de la retina* (*efecto de Stiles-Crawford*). (*Según W. S. Stiles* [7].)

longitudes de onda cerca de la región de 507 mμ recibido con largas exposiciones. Las condiciones de una serie de experimentos fueron: un campo de un diámetro subtendiendo un ángulo de 47° en el ojo; exposiciones de unos 15 segundos, y visión binocular con movimientos libres del ojo [9].

De manera aproximada, el umbral absoluto es la intensidad mínima a la que empieza a verse el campo. Ha de definirse este valor sobre una base estadística, pues si se fija la intensidad del aparato cerca del límite de visibilidad, a veces se ve el campo y a veces no. No existe un valor definido con precisión debajo del cual no se ve nunca la luz y encima del cual se ve siempre. Hay, en cambio, un intervalo de intensidades donde la visión es incierta y no se puede predecir. Este intervalo de incertidumbre se encuentra en todos los experimentos sobre umbrales luminosos. Hay que explicarlo por una combinación de variación biológica dentro del organismo y fluctuaciones puramente físicas en el estímulo luminoso mismo. En el caso de un relámpago pequeño y breve presentado en la periferia ha sido posible demostrar que las fluctuaciones cuánticas, que entonces son muy grandes relativamente pues el número de cuantos que actuan sobre la retina es muy pequeño, son una causa importante de incertidumbre en la visión [10–14].

Por definición se toma el umbral absoluto como la intensidad a la que la presencia de un campo iluminado grande puede ser detectada por el ojo en un 50% de las pruebas, cada una de las cuales dura 15 segundos. Hay variaciones de sujeto a sujeto en el valor umbral así definido, e incluso para un mismo sujeto varía de un día a otro. Se observan variaciones semejantes en el caso de los valores umbrales definidos estadísticamente y que corresponden a otras condiciones experimentales, por ejemplo un relámpago pequeño y breve.

El valor umbral medio así obtenido para

sujetos jóvenes normales lleva a la conclusión de que, en el límite de visibilidad para un campo grande, cada bastoncito absorbe por término medio sólo un cuanto cada cien minutos. La energía del cuanto para $\lambda = 507$ mμ es de $3{,}92 \times 10^{-12}$ ergs.

Esta conclusión se basa, en primer lugar, en una medida simple y directa: la del valor medio de la energía absoluta del flujo luminoso que entra en el ojo a través de la pupila en el umbral. Esto se hace determinando el flujo de energía de la fuente, que está a una intensidad mayor, y rebajándolo al valor umbral mediante el uso de filtros de propiedades transmisoras conocidas. La segunda base fundamental de la conclusión mencionada antes es una estimación de la fracción k de luz de 507 mμ de longitud de onda que después de haber entrado en el ojo es absorbida por la rodopsina contenida en los bastoncitos humanos vivos. Se deriva el valor de k: 1°, a partir de una determinación de las pérdidas de luz que ocurren en los medios ópticos del ojo humano, desde la córnea a la retina; 2°, de una determinación de la fracción de luz absorbida por la rodopsina en los bastoncitos vivos. Ambas determinaciones están sujetas a incertidumbre y, desde luego, los valores varían probablemente de ojo a ojo. La fracción de la luz de 507 mμ de longitud de onda que llega a la retina a través de los medios oculares es 0,50 según Ludvigh y MacCarthy [15]. La fracción de esta luz que es después absorbida por la rodopsina de los bastoncitos vivos ha sido estimada por Rushton [16] en 0,20, basándose en un método delicado de densitometría de reflexión. Esencialmente es un método en el que la intensidad de la luz reflejada en la parte de atrás de la retina es medida antes y después de haber blanqueado completamente la rodopsina *in situ* con una luz intensa. La diferencia corresponde pues a la luz absorbida en una pasada doble a través de la capa de rodopsina contenida en los bastoncitos adaptados a la oscuridad. A partir de las hipótesis anteriores encontramos $k = 0{,}50 \times 0{,}20 = 0{,}10$.

El valor exacto de la fracción de luz absorbida por los bastoncitos es de importancia relativamente escasa en el contexto actual. Incluso en el caso extremo e imposible de que un 100% de la luz que entra en el ojo fuese absorbida por la sustancia contenida en los bastoncitos retinales, el umbral absoluto para el extenso campo considerado antes tendría todavía el valor medio notablemente bajo de un cuanto absorbido por bastoncito cada diez minutos.

FIGURA 6 – *El anillo de Landolt, usado para la prueba de la agudeza visual. La anchura de la brecha y el espesor del anillo son iguales a un quinto del diámetro total de éste.*

El valor $k = 0{,}10$, que debe considerarse como una estimación razonable más que una medida precisa, será tomado aquí como base. Conduce a una media de $1{,}73 \times 10^{-4}$ cuantos absorbidos por bastoncito por segundo en el umbral absoluto para un campo grande y larga exposición. Por término medio, pues, un cuanto es absorbido cada segundo por cada 5800 bastoncitos. La imagen retinal de un campo circular que abarque 47° en el ojo tiene un área de unos 1,5 cm². Cuando la imagen cae sobre la periferia retinal cubre unos 750 000 conos y 20 millones de bastoncitos. Este gran número de bastoncitos sólo absorbe una

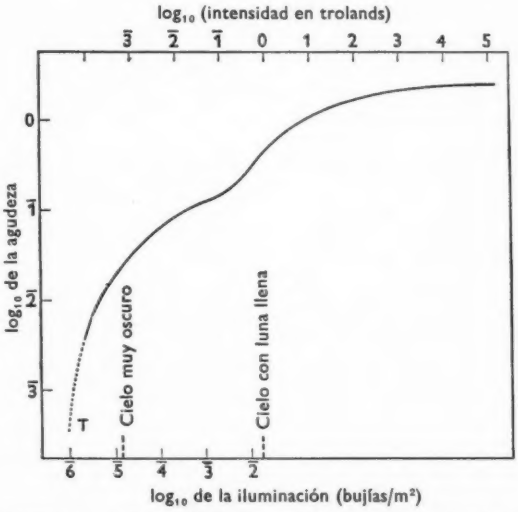


FIGURA 7 – *La variación general de la agudeza visual con la intensidad luminosa cuando el objeto de prueba es un anillo de Landolt. Se define la agudeza visual como la recíproca del ángulo (en minutos) abarcado en el ojo por la brecha del anillo. Un troland (en honor de Troland) es la iluminación retinal producida por una superficie con una iluminación de 1 bujía decimal por metro cuadrado cuando el área de la pupila es un milímetro cuadrado. Las iluminaciones del campo externo para intensidades menores están dadas en la escala inferior de abcisas. El punto T indica el valor medio de la iluminación en el umbral absoluto para un área vacía de 47° de diámetro, para sujetos jóvenes. (Véase* [9].)

media de 3500 cuantos por segundo en las condiciones descritas.

VISION POR MEDIO DE BASTONCITOS A ILUMINACIONES MAS ALTAS

En el umbral absoluto, el campo luminoso, en aquellas pruebas en las que se le ve, tiene una apariencia difusa, muy vaga. Pero si se eleva la intensidad luminosa a tres veces el umbral absoluto, el sujeto ve claramente y puede distinguir los dedos de su mano enfrente de él. A una intensidad diez veces el umbral absoluto, si se coloca en medio del campo un anillo negro de Landolt (Fig. 6), cuya brecha subtienda un ángulo de un grado en el ojo, un sujeto entrenado puede percibir la posición de la brecha en un 50% de las pruebas. Así pues, la visión de formas adquiere así un grado medible de eficiencia, incluso aunque la absorción media de luz por bastoncito se ha elevado sólo a unos 0,002 cuantos por segundo: es decir un cuanto cada diez minutos. Este nivel de intensidad es un poco menor que el que corresponde, en términos de los cuantos absorbidos por bastoncito, a los cielos nocturnos más oscuros [9] (Fig. 7).

A causa de que los valores de iluminación mencionados arriba son tan bajos en términos de cuantos activos, la teoría cuántica de la luz conserva su importancia a niveles más altos de intensidad, cuando la visión se hace relativamente más eficiente. La iluminación del cielo con luna llena es aproximadamente 20 000 veces la del umbral absoluto del ojo. En tales condiciones puede observarse la posición de la brecha del anillo de Landolt de dimensiones angulares mucho más pequeñas: la brecha subtiende 3 minutos de arco en el ojo. Este es un grado de resolución bastante bueno, puesto que la resolución máxima que el ojo puede alcanzar en luz brillante para el mismo tipo de objeto es sólo siete veces mayor, correspondiente a una brecha de 0,4 minutos de arco (esta resolución máxima se logra con los conos de la fóvea central y corresponde aproximadamente a la separación angular de esos conos [34]). En el caso del cielo iluminado por la luna, cada bastoncito absorbe por término medio 4 cuantos por segundo. En la reacción fotoquímica primaria, cada uno de estos cuantos actúa sobre una sola molécula, o más bien sobre un solo grupo cromofórico de rodopsina. El número de tales grupos cromofóricos contenidos en un bastoncito humano es del orden de 10^8. La eficiencia cuántica del blanqueamiento de la rodopsina no es mayor que la unidad: es decir la razón del número de moléculas de rodopsina que se han blanqueado como resultado de absorción cuántica al número de moléculas que han absorbido un cuanto puede ser la unidad o quizá un medio, pero nunca es mayor que la unidad. No hay reacción en cadena en la que un cuanto absorbido pueda llevar al blanqueamiento de varias moléculas; se deriva esta conclusión principalmente de medidas de la eficiencia cuántica en soluciones de rodopsina e *in situ* en retinas animales. Así pues, como ha hecho resaltar Baumgardt [17], en el intervalo de intensidades luminosas de la visión nocturna, la velocidad de blanqueamiento de la rodopsina en los bastoncitos permanece muy pequeña. A la iluminación del cielo con luna llena es de sólo 4×10^{-8} por segundo, o 0,015% por hora. Claramente, la acción de la luz sobre los bastoncitos no es una reacción fotoquímica ordinaria que envuelva grandes números de moléculas; el número de moléculas de rodopsina que son activadas por la luz en cada bastoncito en visión nocturna es pequeño. Ha de haber un mecanismo amplificador, cuya naturaleza es todavía desconocida, en cada bastoncito receptor. Al nivel de la luz lunar, los conos parafoveales cooperan con los bastoncitos. A iluminaciones superiores, el centro foveal es la parte más sensible de la retina y los conos entran en plena función.

Cuando se utiliza la visión con bastoncitos siempre está basada en un número pequeño de cuantos por bastoncito y el número total de moléculas de rodopsina contenidas en cada bastoncito apenas es reducido por blanqueamiento, incluso al nivel más alto de iluminación que corresponde al intervalo de visión normal con bastoncitos. En el límite inferior de dicho intervalo, como ya hemos visto, la fracción de bastoncitos que es estimulada por la luz por unidad de tiempo es muy pequeña. La unidad apropiada de tiempo no es probablemente menor de 0,1 segundos; éste es el valor aproximado del tiempo de acción fisiológica derivado de experimentos sobre sumación temporal en el umbral absoluto. Para exposiciones menores o iguales a este tiempo de acción fisiológica, la cantidad total media de luz que llega al ojo es el factor determinante. Para exposiciones más largas, aumenta la cantidad total de luz requerida para una respuesta umbral. Suponiendo que el efecto de un cuanto sobre un bastoncito dure también 0,1 segundos, puede decirse que en el caso de campos extensos — presentados en exposiciones largas, del orden de un minuto, a iluminaciones bajas — los bastoncitos

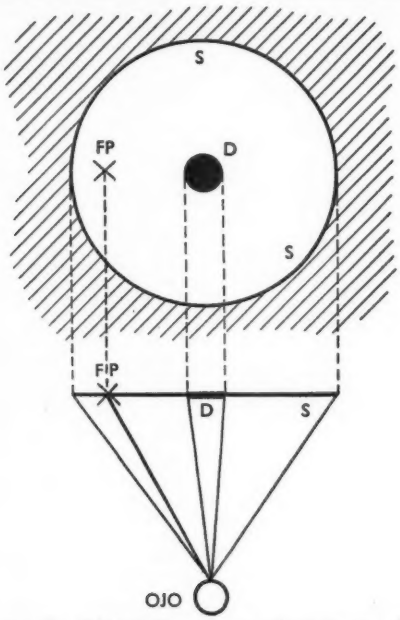


FIGURA 8 – *Disposición para experimentos por el método de fijación y destello.*

que reciben la «imagen retinal» del campo están sin estimular la mayoría del tiempo. Si un bastoncito absorbe por término medio un cuanto cada diez minutos, lo que corresponde a un cielo nocturno muy oscuro, estará en un estado de excitación sólo 0,1 segundos cada diez minutos. Sin embargo, ciertos experimentos muestran que la absorción de la luz por la retina puede, incluso a intensidades cerca del umbral absoluto, llevar a ciertos tipos de reacciones fisiológicas que duran hasta 5–10 segundos [18]. La estimulación de un bastoncito por un cuanto puede durar ese tiempo, pero aún así a intensidades bajas ocurriría sólo durante una fracción del tiempo.

AGUDEZA DE LA VISION CON BASTONCITOS Y SU DEPENDENCIA DEL NIVEL DE ILUMINACION

El hecho familiar de que la agudeza visual — es decir el poder resolutivo del ojo en términos de la visión de formas o de la capacidad de ver detalles — sea mayor al aumentar la intensidad luminosa, con objetos de prueba tales como el anillo negro de Landolt, ha permanecido durante mucho tiempo sin una explicación adecuada.

En algunos experimentos sobre la sensibilidad de los bastoncitos, realizados con un disco negro presentado en medio de un campo iluminado grande, la tarea del sujeto era simplemente

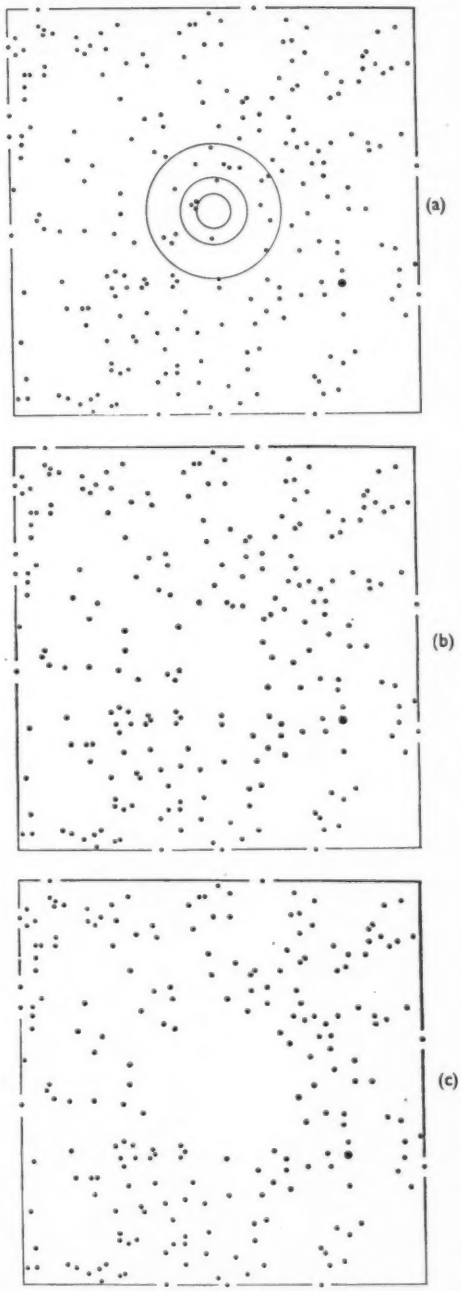


FIGURA 9 – a) *Distribución al azar calculada de 250 puntos en una región dividida en 10 000 áreas pequeñas iguales (un punto más grueso indica dos puntos coincidentes en la misma área). Los grandes círculos concéntricos en medio del diagrama representan la imagen retinal de tres discos negros de diámetro creciente.* b) *y* c) *La misma distribución de cuantos que ocurriría en presencia de los dos discos mayores.*

detectar la presencia del disco, que es uno de los objetos más simples que pueden utilizarse para probar la agudeza visual. Ya hemos hablado del caso más complicado del anillo de Landolt, en parte porque es una prueba típica de las utilizadas para medir la agudeza visual con fines clínicos. Con la ayuda de un punto de fijación (Fig. 8), el campo luminoso junto con el objeto negro fue presentado siempre en relámpagos de unos pocos milisegundos de duración. El sujeto fijó la mirada en un punto rojo pequeño luminoso FP que justamente se podía ver sin esfuerzo en la oscuridad. Puesto que la imagen del punto de fijación FP se formaba siempre en medio de la fóvea, la retina estaba fija en el espacio excepto por imprecisiones de fijación de sólo unos minutos de arco, que no son importantes en estos experimentos. El sujeto operaba un obturador y decía si había visto o no el disco negro D, que para comprobar era retirado del campo en algunas pruebas. Estos experimentos fueron llevados a cabo con el ojo adaptado a la oscuridad, y se permitía que el ojo recobrase tal adaptación entre los sucesivos relámpagos. Así pues el experimento se refiere a un estado fisiológico constante del sistema visual.

Se dispuso el aparato de tal forma que el campo amplio (S) que rodeaba al disco negro estaba iluminado uniformemente; sin embargo, los cuantos absorbidos por los bastoncitos en cada destello están distribuídos al azar y forman en la retina una nube como la mostrada en la Fig. 9. Esta distribución al azar de cuantos en la retina es, desde luego, diferente en cada destello, aunque por comodidad se ha utilizado la misma distribución que aparece en todos los diagramas de la Fig. 9. Está claro que la imagen oscura del disco negro no será detectada si su diámetro es pequeño comparado con la distancia media que separa cuantos vecinos. En este caso, la distribución al azar de cuantos absorbidos formada cuando el disco está presente no será en la práctica distinguible de las distribuciones formadas cuando no hay un disco negro en medio del campo. En cada destello hay áreas retinales sin estimular por la luz entre los bastoncitos que han absorbido un cuanto (o algunas veces más de un cuanto). La presencia o ausencia de una «sombra» negra en estas áreas no puede ser observada en este experimento.

En teoría, la visión del disco negro se hace posible cuando produce en la retina una sombra mayor que las regiones sin estimular que ocurren de un modo natural entre los cuantos absorbidos. Puede ilustrarse esto comparándolo a una carretera seca en la que han caído algunas gotas dispersas de lluvia. Si se retira un objeto grande, como un coche, su posición previa podrá ser deducida por la ausencia de gotas; pero no será así si lo que se mueve es un objeto pequeño, como un guijarro.

Así pues la distribución cuántica de la excitación retinal fija un límite natural a la precisión de la visión, tal como se la ha estudiado en estos experimentos. Es de suponer que los objetos negros más pequeños serán detectables cuanto mayor sea la intensidad del relámpago, pues entonces es mayor el número medio de cuantos absorbidos por unidad de área de la retina.

Los resultados experimentales coinciden cualitativamente con esta predicción, pero se acepta generalmente que un cuanto activo no es suficiente para que el ojo detecte un estímulo luminoso. El límite teórico de la agudeza visual, de que acabamos de tratar, es pues un límite superior y de hecho no podemos esperar alcanzarlo.

Si un cuanto activo fuese suficiente para la visión, se percibiría el estímulo luminoso cuando se hubiese absorbido al menos un cuanto que hubiese actuado sobre un bastoncito en cualquier parte de la retina. La estadística muestra que la probabilidad de que esto ocurra depende sólo del número medio total de cuantos absorbidos por los bastoncitos y es independiente del área o áreas retinales y de la distribución temporal de los estímulos. Así, si un cuanto fuese suficiente para ver, el resultado de los experimentos de umbral absoluto (detección de un estímulo luminoso presentado sobre un fondo de intensidad nula) sería el mismo que si hubiera «sumación fisiológica» completa (véase más adelante) en el sistema visual en tiempo y en espacio, mientras que de hecho se encuentra que la sumación ocurre sólo en un área y un tiempo limitados. La cantidad media total de luz requerida para ver, tal como queda definida por las condiciones del aparato y del experimento, no es independiente del área y del tiempo. Es también mayor cuando se utilizan los dos ojos en vez de uno [19], mientras que para la «visión con sólo un cuanto» se esperaría que fuese la misma para uno o ambos ojos, incluso cuando los dos ojos pertenecen a dos seres humanos diferentes que responden independientemente uno del otro [13].

Hemos, pues, de concluir que se necesitan varios cuantos activos para la visión y que han de absorberse estos cuantos dentro de un área retinal limitada. Han de absorberse también en un período de menos de 0,1 segundos, condición que

se cumple cuando se utilizan relámpagos breves, como en los experimentos sobre agudeza visual antes descritos.

Puede estudiarse la sumación espacial en la retina utilizando como objeto de prueba un par de puntos luminosos colocados a diversas distancias entre sí. Si estos objetos están separados por una distancia angular de unos 20′ de arco o menos en la periferia, sus efectos son hasta cierto punto aditivos y hay sumación fisiológica, al menos parcial. Cuando los dos puntos están suficientemente cerca uno del otro, el umbral está determinado solamente por la cantidad total de luz procedente de ambos puntos: esto es sumación fisiológica completa. Si los dos puntos están bastante separados existe todavía una probabilidad mayor de ver al menos uno de ellos cuando ambos se presentan juntos que cuando se presentan uno a uno. Ocurriría el mismo aumento en la probabilidad de verlo si se presentase sólo un punto a dos sujetos independientes y se considera que se ha visto el punto cuando lo percibe al menos uno de ellos; en este caso hay sólo «sumación de probabilidad» y no sumación fisiológica. En el umbral los dos ojos de un sujeto responden muy aproximadamente de acuerdo con la sumación de probabilidad [19].

Hay pues un campo limitado de sumación fisiológica de los efectos de los cuantos de luz absorbidos por la retina adaptada a la oscuridad. En vez de considerar cuantos simples o más bien bastoncitos separados, cada uno de los cuales ha sido activado por lo menos por un cuanto, hemos de considerar en la distribución de estimulación muchas «unidades visuales», cada una de las cuales contiene muchos bastoncitos. Para cada unidad estos bastoncitos pueden simplemente ser todos aquellos que están conectados a una misma fibra del nervio óptico (Fig. 12); es también posible que la convergencia efectiva ocurra a otros niveles del sistema nervioso, como el cerebro. Cada una de estas unidades será estimulada cuando ha absorbido un cierto número de cuantos, que generalmente se acepta ser al menos dos y probablemente no más de unos diez.

Suponiendo, para simplificar, que estemos trabajando con una región retinal de propiedades uniformes en toda su área — una hipótesis que nunca se cumple estrictamente para áreas retinales tan grandes como las consideradas aquí — puede intentarse una interpretación teórica de estos experimentos considerando que los puntos de los diagramas de la Fig. 9 corresponden, en vez de a cuantos absorbidos aislados, a unidades visuales independientes, cada una de las cuales ha absorbido suficientes cuantos para ser excitada.

El punto importante es ahora cuántas unidades visuales han recibido impulsos múltiples de magnitud suficiente para ser estimuladas. Mientras en el área retinal que recibe la imagen del campo grande haya muchas unidades visuales que han recibido muy pocos cuantos para responder, la cuestión se presenta relativamente simple. Esto es porque no importan los niveles de estimulación de las otras unidades, que han recibido cuando menos el mínimo número de cuantos necesarios. Lo que importa en esta teoría es si las unidades son estimuladas o no, no su grado de estimulación.

Se notará que en esta etapa estamos tratando no simplemente de la distribución de los cuantos activos entre los receptores en la periferia extrema del sistema nervioso óptico, sino del problema de la organización funcional de la retina humana y del sistema visual. Sobre este problema hay relativamente muy poca información disponible, al menos de género cuantitativo, procedente de fuentes independientes, tales como estudios anatómicos. El problema es complejo; por ejemplo,

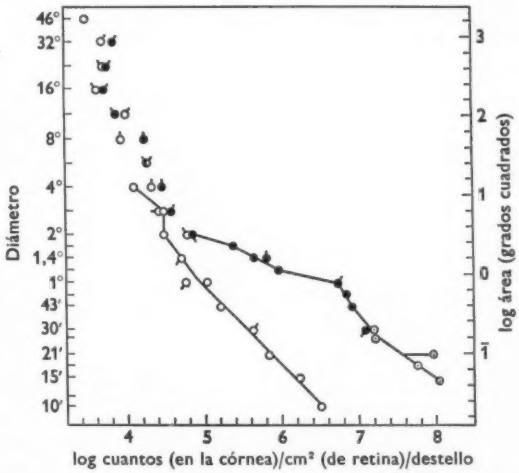


FIGURA 10 – *Resultados de las medidas hechas por el método de la Fig. 8 con discos negros de diámetros variables (puntos negros), y de medidas en el umbral absoluto hechas en condiciones semejantes con campos luminosos presentados contra un campo de intensidad nula (círculos pequeños). Todos los objetos están centrados a 20° del punto de fijación. Destellos luminosos de 0,0026 segundos de duración. La banda espectral centrada cerca de 507 mμ. No pueden verse discos negros de menos de 15′ de diámetro, incluso a intensidades mayores. La línea recta de 45° de inclinación a través de los círculos vacíos corresponde a sumación completa, es decir a una cantidad total de luz que entre en el ojo en el umbral, independientemente del área del campo luminoso de prueba. (Según P. E. Hallett* [20].)

muchos experimentos sobre sumación espacial en el umbral se han hecho mediante el uso de campos de prueba concéntricos de diámetro creciente, en vez de dos puntos luminosos separados por una distancia creciente. Los resultados de estos dos tipos de experimento no coinciden cuantitativamente en lo que se refiere a la extensión espacial de la sumación fisiológica, que parece ser mayor en los experimentos concéntricos. Este hecho aún carece de explicación. Por otra parte, la teoría cuántica de la luz ha ayudado a resolver

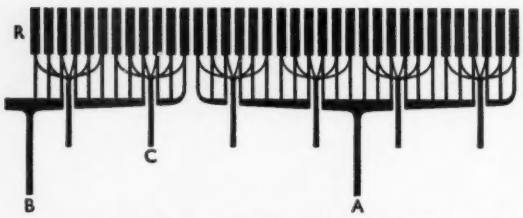


FIGURA 11 – *Diagrama esquemático indicando un tipo posible de conexión nerviosa en el que los mismos receptores retinales (R) se organizarían en unidades funcionales de tamaños diferentes. Las unidades más pequeñas (C) deberían tener un umbral mayor, en términos de la iluminación por unidad de área retinal, que las unidades grandes (A o B), pues cada una de ellas recogería luz sólo de un área menor. (Según Pirenne y Denton* [21].)

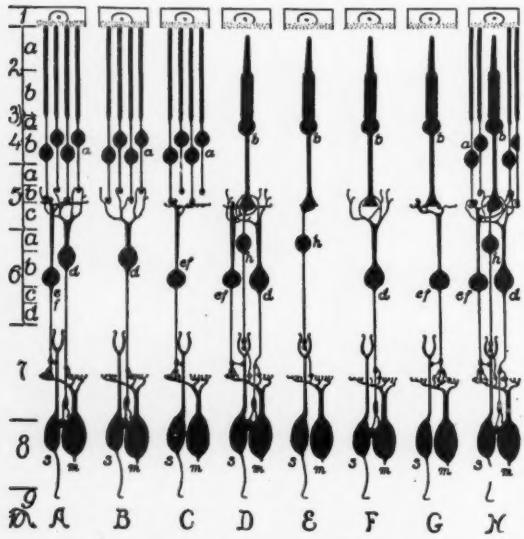


FIGURA 12 – *Tipos de conexiones observadas anatómicamente entre los conos y los bastoncitos y las fibras del nervio óptico. A, B y C muestran cómo un mismo nervio óptico puede estar conectado a varios bastoncitos. El número de bastoncitos así conectados puede ser muy grande, del orden de decenas de millares. (Según S. Polyak* [22]. *Copyright* (1941) *de la* University of Chicago Press.)

algunas dificultades acerca del funcionamiento de la retina.

TEORIA DE LOS EXPERIMENTOS DE AGUDEZA

A causa de las fluctuaciones cuánticas, la distribución de las unidades visuales estimuladas por la luz será al azar y variará de un destello a otro; se parecerá pues a la distribución de los puntos de la Fig. 9, pero aquí el tamaño de las unidades visuales es un factor importante. Dichas unidades se entrelazan probablemente en la retina humana, pero no tenemos datos suficientes sobre tal cuestión. Está claro que han de esperarse complicaciones considerables en el aspecto cuantitativo de la teoría cuando el destello luminoso se hace suficientemente intenso para causar estimulaciones de una gran proporción de las unidades y cuando el área de la imagen del objeto de prueba se hace del orden del área de una unidad, especialmente debido a que es probable que la imagen cubra entonces sólo partes de algunas de las unidades. Si las unidades visuales estimuladas son pocas y bastante separadas entonces no surgen esas complicaciones. Bajo tales condiciones, e incluso a iluminaciones algo mayores, se encuentra que la iluminación umbral, definida como intensidad luminosa por unidad de área, es aproximadamente la misma para la detección de un disco negro en los experimentos citados que para la detección de un campo circular luminoso que tenga la misma área; esta última disposición corresponde en cierto modo al negativo de la primera, en el sentido utilizado en fotografía. A iluminaciones mayores, las curvas para el umbral de visibilidad de un disco negro y un círculo luminoso divergen, mostrando que empiezan a surgir otras complicaciones (Fig. 10).

La coincidencia de ambas curvas a bajas iluminaciones apoya la teoría, pues muestra que la energía media de la luz que el disco negro impide que llegue a la retina es la misma que la de la luz requerida para detectar un disco luminoso de la misma área. Además, en la curva correspondiente a los experimentos con el disco negro ocurre una discontinuidad correspondiente a un área en la que se da sumación completa en el caso de un disco luminoso presentado contra un campo de intensidad nula (Fig. 10). Este área es probablemente del orden de magnitud del área de las unidades visuales.

Hay varias razones para suponer que los mismos bastoncitos retinales están combinados para formar unidades grandes y pequeñas, pero a niveles

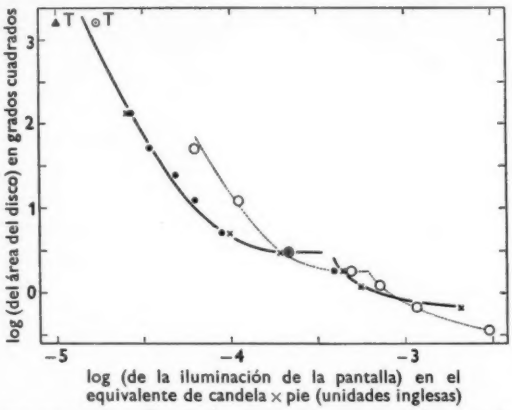


FIGURA 13 – *Resultados de experimentos semejantes a los experimentos con discos negros de la Fig.* 10, *para otro sujeto. Se dan los resultados para dos posiciones retinales:* 20° (*curvas llenas*) *y* 10° (*curvas a trazos*) *del punto de fijación. Se hicieron los experimentos con luz blanca en destellos de* 0,03 *segundos de duración.* (*Según Pirenne* [23].)

luminosos bajos sólo las unidades grandes pueden en la práctica responder, porque entonces muy pocas unidades pequeñas reciben suficientes cuantos para ser estimuladas (Fig. 11). Sería pues de suponer que las unidades grandes entren en acción progresivamente al aumentar la iluminación del destello y, cuando ya están todas excitadas, entran en acción progresivamente las unidades pequeñas. Al final, las unidades más pequeñas de la periferia retinal, que consisten sólo de conos o de conos y bastoncitos, serán excitadas.

La Fig. 13 muestra los resultados de los experimentos anteriores hechos con un sujeto y en condiciones ligeramente diferentes. Estos experimentos se refieren principalmente a los límites de visibilidad de discos negros y abarcan un intervalo menor de diámetros de los discos. Muestran que los resultados difieren considerablemente a 20° y a 10° de la fóvea; se observó también esto en otros experimentos hechos con el sujeto de la Fig. 10. Incluso dentro de la periferia de la retina, las propiedades del sistema visual varían de una posición a otra. Es esto algo que se observa en muchos tipos de experimentos; es ciertamente de importancia práctica en lo que se refiere al uso de los ojos, pero complica mucho la comprobación de las teorías visuales.

Aunque los resultados de las Figs. 10 y 13 están en general de acuerdo, hay diferencias entre ellos, debidas probablemente a diferencias en las condiciones experimentales o quizá en los ojos de los dos sujetos. Los experimentos de este tipo, a pesar de su simplicidad aparente, exigen un esfuerzo considerable de concentración psicológica por parte del sujeto. Son también muy largos pues cada punto experimental viene dado por una determinación estadística basada en resultados correspondientes a muchos destellos. Después de un par de horas, la fatiga del sujeto tiende a conducir a irregularidades en sus respuestas. Por tanto el número de puntos que pueden determinarse en una sesión es limitado. Además, a causa de las variaciones del mismo sujeto de un día a otro, no es siempre fácil coordinar los resultados obtenidos en sesiones diferentes. Han de tomarse precauciones especiales para prevenir que el experimentador influya sin quererlo en los resultados del sujeto [24].

APARIENCIAS SUBJETIVAS

En experimentos en el umbral absoluto hechos con un campo luminoso bastante grande, cuya presencia ha de observarse contra un campo de intensidad nula, es sugestivo suponer que se empieza a ver el campo grande cuando se estimula sólo una de las unidades visuales cubiertas por su imagen retinal. Pero aunque se trabaja a menudo sobre esta suposición no existe ninguna prueba de que sea cierta. La «teoría de los dos cuantos» desarrollada por van der Velden [12] y Bouman [30] está basada en la hipótesis de que la condición para ver es que una unidad visual sea activada por dos cuantos al menos: el número dos se fija de acuerdo con la teoría. Por otra parte, Baumgardt ha presentado una teoría más complicada del umbral absoluto [25], según la cual el ver un campo de prueba depende de «coincidencias» más complicadas que la hipótesis mencionada de unidades visuales fisiológicamente independientes.

La apariencia subjetiva del campo es de poco uso inmediato para probar la hipótesis anterior. Podría pensarse que cuando sólo una, dos o tres unidades son excitadas dentro del área correspondiente a un campo bastante grande, el sujeto debería ver una, dos o tres zonas luminosas discretas en posiciones definidas. Pero razonamientos de este tipo son muy inseguros porque, entre otras cosas, no existiría un propósito práctico o biológico en que «veamos» la distribución de estimulaciones de nuestra retina. Se hicieron algunos experimentos en los que un sujeto tuvo que observar: *a*) un gran campo circular expuesto mediante destellos de una iluminación fija cerca del umbral; *b*) sólo la mitad superior; *c*) sólo la mitad inferior del campo [26]. Las condiciones experimentales,

incluyendo la iluminación de los campos, permanecieron constantes y el orden de presentación de *a*), *b*) y *c*) era desconocido por el sujeto.

El sujeto confundió algunas veces los medios campos *b*) y *c*) y también confundió otras veces un medio campo con el campo total *a*). Esto está de acuerdo con la teoría de que sólo unas pocas (a veces quizá sólo una) unidades visuales cubiertas por el ojo son estimuladas en el umbral. Debemos pues suponer que la estimulación causada por el campo total ha de estar algunas veces restringida a la mitad superior; esto explica las confusiones.

Sería más directo encontrar si el campo total puede ser confundido con un pequeño campo de prueba único que cubra un área de aproximadamente el tamaño del área retinal en la que se sabe que ocurre sumación fisiológica, o con distribuciones al azar de algunas áreas semejantes. Pero ha de utilizarse la misma iluminación para todo el campo que para los campos pequeños. Si se utiliza una iluminación mayor para los campos pequeños es más probable la estimulación de las unidades visuales y esto puede introducir una diferencia significativa entre los dos modos de estimulación, pues está bien claro que unos pocos puntos luminosos verdaderamente brillantes no se confunden con un campo extenso. La dificultad que surge aquí es que si sólo un campo luminoso pequeño (o muy pocos) es utilizado a una iluminación próxima al umbral (es decir una frecuencia de un 50% de casos de visión) del campo grande, la frecuencia con que se alcanza el umbral del sujeto en el caso de campos pequeños es tan reducida que en la práctica apenas tiene aquél oportunidad de comparar su aspecto con el del campo grande. Este efecto sobre la iluminación umbral se explica fácilmente basándose en la sumación de probabilidad.

Tampoco en el caso de los experimentos con un disco negro se ve el campo luminoso como un conjunto de puntos luminosos; las regiones no estimuladas predichas por la teoría no son percibidas subjetivamente. A iluminaciones bastante mayores que a las que empieza a verse el campo luminoso grande, pero ajustadas a una iluminación menor que la necesaria para ver el disco negro, este disco permanece desde luego completamente invisible. Y, sin embargo, el campo puede entonces aparecer bastante brillante e iluminado muy uniformemente. Esto ocurre, por ejemplo, con un disco negro de 1° de diámetro, dos veces el diámetro angular del Sol; a juzgar por la apariencia subjetiva del campo, a un sujeto que no esté acostumbrado a estos experimentos le parecerá muy difícil creer que no pudo ver un objeto tan evidente.

Aparte de la dificultad de mantener la atención, uno de los problemas con que se enfrenta el sujeto humano en experimentos en el umbral absoluto es el de evitar confusión entre el campo de prueba con las nubes cambiantes de iluminación o «fosfenos» que se ven subjetivamente en la oscuridad total. Algunos sujetos sufren las perturbaciones de los fosfenos mucho menos que otros, pero en general la oscuridad completa nunca parece completamente oscura o negra al ojo adaptado a la oscuridad. El campo visual está lleno de *Eigenlicht*, la luz propia del ojo. Sin duda los fosfenos son debidos a alguna forma de actividad espontánea del sistema nervioso, pero su origen exacto es incierto. Pueden estar relacionados con el «ruido oscuro» que según algunas teorías existiría en el sistema visual humano [27]. Este «ruido oscuro» consistiría en actividad nerviosa espontánea indistinguible de la actividad causada por la acción de la luz en la retina. Puede, por ejemplo, ser debido a la actividad térmica de las moléculas de rodopsina en los bastoncitos, en el supuesto de que dicha activación cause los mismos efectos que la activación debida a la absorción de la luz. No hay razón para suponer que tal «ruido oscuro» haya de conducir necesariamente a sensaciones luminosas en la oscuridad completa, pues éstas no serían de uso biológico. Pero debido a que, por definición, el «ruido oscuro» sería del mismo tipo que la estimulación nerviosa causada por la luz, interferiría necesariamente con la percepción de estímulos luminosos si el ruido fuese de suficiente magnitud. Esto puede explicar por qué es necesario más de un cuanto activo para la visión, incluso aunque los efectos extraños que ocurrirían entonces en lo que se refiere a sumación pueden también hacer biológicamente inútil la visión con sólo un cuanto. Actualmente no parece que exista una prueba convincente de la presencia o ausencia de tal «ruido oscuro» en una intensidad significativa en el sistema visual humano.

CONCLUSION

La mayoría de los experimentos descritos fueron hechos con destellos luminosos breves. En lo que se refiere a la agudeza visual, los procesos que ocurren en la visión ordinaria son probablemente mucho más complicados. Entonces la retina se adapta a la iluminación existente y el ojo se mueve continuamente haciendo pausas de fijación del orden de 0,1–0,2 segundos durante el curso de sus desplazamientos irregulares. En tales

condiciones es probable que la percepción de objetos oscuros dependa de respuestas *off* en el sistema visual; es decir, respuestas nerviosas que ocurren cuando se retira la luz de la retina. Se han observado estas descargas *off* en el caso de preparaciones electrofisiológicas de ojos de vertebrados, por ejemplo en fibras del nervio óptico de la rana [28]. Pueden ocurrir en la retina humana cuando, como resultado de un desplazamiento del ojo, la imagen de un objeto oscuro cae de repente sobre un área previamente iluminada. Debe recordarse aquí que hay muchas pruebas de que la estimulación de la retina en condiciones estables lleva a una visión muy ineficiente, o a una pérdida completa de la visión después de unos pocos segundos. Así, puede inferirse que cuando el ojo mira a un campo grande iluminado uniformemente, la parte central de este campo se hace pronto visualmente inefectiva, puesto que sólo en los bordes del campo los movimientos del ojo causan cambios en la iluminación que llega a la retina. Si esto es así, el único modo de afectar la retina cuando el ojo trata de percibir un pequeño objeto negro en el centro de un campo grande sería el desplazamiento de la imagen oscura del objeto en la retina. Existen razones para creer que en todo el intervalo de la visión con bastoncitos, y en una gran parte del intervalo de la visión con conos, la desaparición de la iluminación retinal por esta imagen oscura es el factor determinante de la respuesta del sistema visual en el límite de la visibilidad del objeto negro [29].

Parte del trabajo experimental mencionado en este artículo ha sido subvencionado por el *Medical Research Council* y la *Nuffield Foundation* y por el *United States Public Health Service* (subvención No. B-1810 del *National Institute for Neurological Diseases and Blindness*).

REFERENCIAS

[1] STILES, W. S. «The physical interpretation of the spectral sensitivity curve of the eye». En «Transactions of the Optical Convention of the Worshipful Company of Spectacle Makers». Págs. 97–107. Spectacle Makers' Company, Londres. 1948.
[2] SCHULTZE, M. *Arch. Mikr. Anat.*, **2**, 175, 1866.
[3] STILES, W. S. *Proc. roy. Soc., B*, **127**, 64, 1939.
[4] RUSHTON, W. A. H. *Progr. Biophys.*, **9**, 239, 1959.
[5] STILES, W. S. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.*, 1961. (En prensa.)
[6] STILES, W. S. y CRAWFORD, B. H. *Proc. roy. Soc., B.*, **112**, 428, 1933.
[7] STILES, W. S. *Sci. Progr.*, **33**, 676, 1939.
[8] FLAMANT, F. y STILES, W. S. *J. Physiol.*, **107**, 187, 1948.
[9] PIRENNE, M. H., MARRIOTT, F. H. C. y O'DOHERTY, E. F. *Spec. Rep. Ser. med. Res. Coun. Lond.*, No. 294, 1957.
[10] HECHT, S., SHLAER, S. y PIRENNE, M. H. *J. gen. Physiol.*, **25**, 819, 1942.
[11] BRUMBERG, E. M., VAVILOV, S. I., y SVERDLOV, Z. M. *J. Phys. Moscow*, **7**, 1, 1943.
[12] VAN DER VELDEN, H. A. *Physica*, **11**, 179, 1944.
[13] PIRENNE, M. H. *Progr. Biophys.*, **2**, 192, 1951.
[14] PIRENNE, M. H. y MARRIOTT, F. H. C. In «Psychology: A Study of a Science. Study I. Conceptual and Systematic. Vol. I. Sensory, Perceptual, and Physiological Formulations». S. Koch (Compilador). Págs. 288–361. McGraw-Hill, Nueva York. 1959.
[15] LUDVIGH, E. y MCCARTHY, E. F. *Arch. Ophthal. N.Y.*, **20**, 37, 1938.
[16] RUSHTON, W. A. H. *J. Physiol.*, **134**, 30, 1956.
[17] BAUMGARDT, E. «Les théories photochimiques classiques et quantiques de la vision et l'inhibition nerveuse en vision liminaire». Editions de la Revue d'Optique, París. 1950.
[18] Ref. [11], pág. 56.
[19] PIRENNE, M. H. *Nature, Lond.*, **152**, 698, 1943.
[20] HALLETT, P. E. *Proc. 3rd Int. Congr. Photobiol.* (Finsen Memorial Congress, Copenhagen). (En prensa.)
[21] PIRENNE, M. H. y DENTON, E. J. *Nature, Lond.*, **170**, 1039, 1952.
[22] POLYAK, S. «The Retina». University of Chicago Press, Chicago. 1941.
[23] PIRENNE, M. H. *Proc. Camb. phil. Soc.*, **42**, 78, 1946.
[24] PIÉRON, H. En «Mechanisms of Colour Discrimination». Pág. 15. Pergamon Press, Londres. 1960.
[25] BAUMGARDT, E. *Proc. Int. Illum. Comm.* XIV Sesión, Bruselas, Vol. A, pág. 78, 1959.
[26] PIRENNE, M. H. *J. Physiol.*, **107**, 47*P*, 1948.
[27] BARLOW, H. B. *Ibid.*, **141**, 337, 1958.
[28] HARTLINE, H. K. *Amer. J. Physiol.*, **121**, 400, 1938.
[29] PIRENNE, M. H. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **74**, 377, 1958. MARRIOTT, F. H. C. y PIRENNE, M. H. *J. Physiol.*, **152**, 24*P*, 1960.
[30] BOUMAN, M. A. *Studium gen.*, **13**, 491, 1960.
[31] CRAWFORD, B. H. *Proc. Phys. Soc. Lond., B*, **62**, 321, 1949.
[32] *Proc. Int. Illum. Comm.*, **3**, 32, 1951.
[33] CRESCITELLI, F. y DARTNALL, H. J. A. *Nature, Lond.*, **172**, 195, 1953.
[34] SHLAER, S. *J. gen. Physiol.*, **21**, 165, 1937.

LECTURAS GENERALES

PIRENNE, M. H. «Vision and the Eye». Chapman and Hall Ltd, Londres. 1948.
Idem. Biol. Rev., **31**, 194, 1956.
MARRIOTT, F. H. C. *Symp. zool. Soc. Lond.*, No. 3, 67, 1960.
BRINDLEY, G. S. «Physiology of the Retina and Visual Pathway». Edward Arnold, Londres. 1960.
PIRENNE, M. H. y MARRIOTT, F. H. C. «Visual Functions in Man». En «The Eye», H. Davson (Compilador), Academic Press, Londres y Nueva York. (En prensa.)
National Physical Laboratory Symposium No. 8, «Visual Problems of Colour». 2 vols. Her Majesty's Stationery Office, Londres. 1958.

Sir James Hall (1761–1832)

V. A. EYLES

Sir James Hall fue amigo de Lavoisier y de James Hutton, el geólogo que propuso la teoría moderna del origen de las rocas ígneas. Hall ideó varios experimentos químicos para probar la validez de esta teoría, intentando reproducir las temperaturas y presiones subterráneas, y fue el primer geólogo que utilizó pruebas químicas para este fin. Este artículo describe estos experimentos y sus resultados.

Sir James Hall (Fig. 1), nacido el 17 de enero de 1761, fue el primer investigador que aplicó con éxito las técnicas experimentales de la química a problemas geológicos. Sus experimentos se llevaron a cabo entre 1798 y 1804, cuando el empleo de estas técnicas en geología era casi desconocido, y se utilizaron para comprobar las teorías propuestas por el amigo de Hall, James Hutton, cuya *Theory of the Earth* se hizo pública por primera vez en 1785 [1].

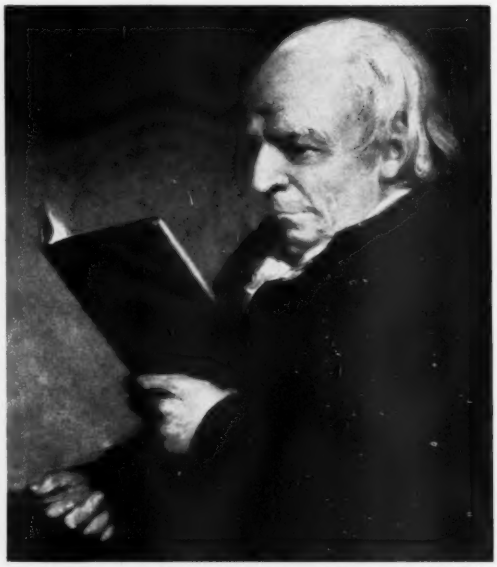


FIGURA 1 – *Sir James Hall, Bt., F.R.S., por Sir John J. Watson-Gordon, R.A.*

La relación sucinta de la vida de Hall explica como llegó a interesarse en los problemas de Hutton. Hall, que descendía de una antigua familia escocesa, fue enviado a los doce años a una escuela cerca de Londres; a los quince heredaba el título de *baronet*. Su tío abuelo Sir John Pringle, que a la sazón era Presidente de la *Royal Society*, le llevó a comer al club de ésta en Londres. Es posible que esto estimulara el interés de Hall hacia la ciencia, pero también es probable que ya hubiera conocido a Hutton, que era amigo y vecino de su padre. En 1777, Hall ingresó en el *Christ's College* de Cambridge, del que fue alumno interno sin graduarse. Al abandonar Cambridge, estudió primero en Francia y después en Ginebra, regresando a Escocia para su mayoría de edad en 1782. En 1783, salió de nuevo al extranjero, viajando durante tres años por Europa. Por aquel entonces se interesaba mucho en la geología y en sus viajes visitó el Vesubio y los volcanes de Sicilia y de las islas Lípari. A Sicilia fue acompañado por el distinguido geólogo francés Déodat Dolomieu. Hall llevó a cabo un estudio cuidadoso del Vesubio y del vecino Monte Somma, y los esquemas y notas que tomó le resultaron muy útiles al estudiar la geología de Escocia. En 1786 pasó varios meses en París, durante los cuales visitó con frecuencia a Lavoisier, convirtiéndose a las ideas químicas de éste.

Regresó a Edimburgo en noviembre de 1786 para casarse con Lady Helen Douglas, y a principios de 1788 dio una conferencia en la *Royal Society* de Edimburgo sobre la «Nueva Teoría de la Química de Lavoisier». Esta conferencia que ocupó tres sesiones, despertó tanto interés como oposición, puesto que las dos sesiones siguientes se dedicaron a la exposición de la teoría del flogisto por Hutton y a la réplica de Hall a Hutton. El discurso de Hall no se publicó, pero lo mencionó Robert Kerr, el traductor del *Traité Elémentaire de Chimie* de Lavoisier, en una carta escrita a Lavoisier el 21 de enero de 1791. Kerr decía que Hall había dado en la *Royal Society* de Edimburgo una descripción muy detallada de la doctrina de Lavoisier y había convertido parte del auditorio, incluyendo al propio Kerr, a la teoría antiflogística [2]. Esta carta prueba que Hall fue uno de los primeros defensores de las doctrinas de Lavoisier en la Gran Bretaña. Hall había sentido un profundo interés por la química desde

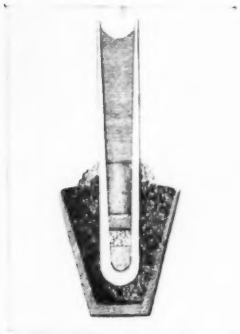


FIGURA 2 – *Tubos de porcelana empleados en la segunda etapa de los experimentos de compresión.*

FIGURA 3 – *Crisol original empleado por Hall en sus experimentos con areniscas, mostrando el vidrio formado al enfriar rápidamente una roca ígnea fundida (altura aproximada 6 cm).*

FIGURA 4 – *Crisol semejante mostrando la masa cristalina obtenida por enfriamiento lento.*

FIGURA 5 – *Barra de hierro taladrada, con tapón. El orificio tiene 7,5 cm de longitud.*

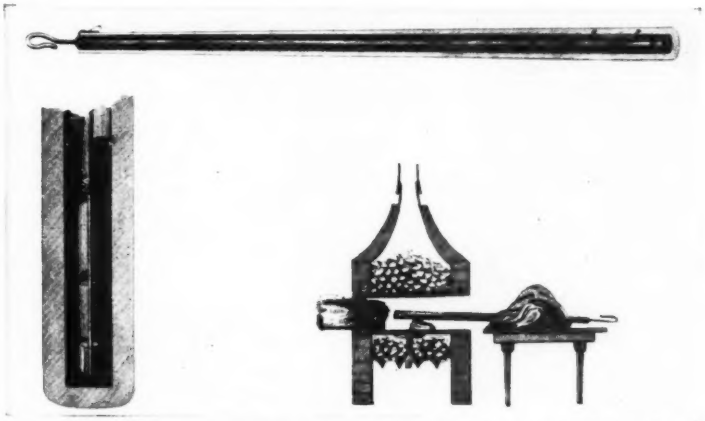


FIGURA 6 – *Los primeros aparatos que Hall empleó en sus experimentos de compresión.*

FIGURA 7 – *Barra taladrada (37 cm de longitud).*

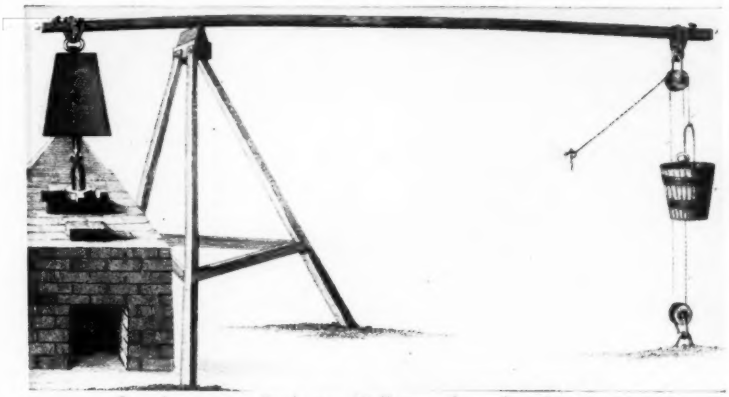


FIGURA 8 – *Aparato empleado por Hall para determinar las presiones desarrolladas durante sus experimentos. Un peso muy grande de hierro cuelga del extremo abierto de un tubo lleno de un metal fusible; la lectura se hace cuando la fuerza expansiva de los gases generados empieza a levantar el peso. El ajuste exacto se obtiene por medio de contrapesos colocados en el cubo suspendido del otro extremo del brazo.*

FIGURA 9 – *Sección delgada de una de las areniscas empleadas por Hall, antes de ser fundida, mostrando textura cristalina típica.*

FIGURA 10 – *Sección delgada de una masa fundida ígnea enfriada lentamente, mostrando cristalitas en una base vítrea.*

FIGURA 11 – *Masa fundida ígnea enfriada lentamente. Su textura es distinta de la típica de la una arenisca antes de ser fundida (véase Fig. 9). (Las figuras 9–11 están muy ampliadas.)*

FIGURA 12 – *Muestra de «mármol» producido en uno de los experimentos de Hall.*

FIGURA 13 – *Tubo de porcelana, seccionado, después de un experimento.*

sus tiempos de estudiante y había asistido a las clases de Joseph Black en Edimburgo.

En 1788 se publicó la primera versión completa de las teorías de Hutton. La reacción inmediata de Hall fue desfavorable; posteriormente dijo que su primera intención fue la de refutar la teoría y que así lo habría hecho de no haber conocido personalmente a su autor, cuya conversación viva y perspicaz contrastaba en forma sorprendente con la oscuridad de sus escritos. Pero después de cerca de tres años de conversaciones casi diarias, Hall empezó a aceptar los principios fundamentales de Hutton y este afortunado cambio de opinión fue la causa de que Hall realizara sus clásicos experimentos.

Para poder apreciar el valor de estos experimentos es preciso tener idea del estado de la geología en aquella época. Como resultado de la observación de las rocas superficiales, de las operaciones mineras y del estudio de los minerales, se había acumulado una gran cantidad de conocimientos, pero hacía falta una teoría maestra que coordinase los hechos conocidos e interpretase su significado. Se sabía bastante acerca de las rocas sedimentarias — calizas, pizarras y areniscas — pero existía otro tipo de rocas (que comprendía los granitos cristalinos, los basaltos y los pórfidos) acerca de cuyo origen los geólogos se encontraban en ignorancia casi absoluta. Actualmente, estas rocas se denominan «ígneas» y se sabe que se han originado en el interior de la Tierra por consolidación de un magma; pero en tiempos de Hutton, la idea generalmente aceptada era que se habían depositado como sedimentos o que habían cristalizado en el seno de una solución. Teniendo en cuenta lo que ya se sabía entonces acerca de la solubilidad de los compuestos químicos, es extraordinario que se hubiera podido sostener tal punto de vista, ya que dichas rocas están formadas principalmente por silicatos minerales prácticamente insolubles, como el cuarzo y los feldespatos. La única excepción la constituían las lavas, término reservado a las rocas que se veía de modo patente que habían fluído de volcanes activos o extinguidos recientemente. La mayoría de los geólogos opinaban que constituían un fenómeno puramente local y creían que muchos basaltos que hoy en día se sabe que son lavas, eran depósitos acuosos. Esta idea fue sostenida por algunos geólogos eminentes hasta principios del siglo XIX.

La primera explicación correcta y completa del origen de las rocas ígneas se debe a Hutton, que supuso que en las capas más profundas de la corteza terrestre todas las rocas estaban fundidas y que grandes cantidades de tales rocas se habían elevado hasta las capas sedimentarias superiores. Una parte había aflorado a la superficie para dar lavas y otra se había solidificado en el interior formando «lavas subterráneas» (capas planas), diques verticales (venas) o grandes masas irregulares, como los granitos de Escocia. Esta hipótesis representó un gran avance de las ideas geológicas; los que aceptaron las ideas de Hutton acerca del origen de las rocas ígneas recibieron el nombre de «plutonistas» en oposición a los «neptunistas», que sostenían las nociones anteriores.

Ciertos puntos de la teoría de Hutton fueron muy debatidos. Hubo dos en que, en aquella época, las críticas parecían tener gran peso, debido a la ignorancia de la química de las rocas fundidas, lo cual no debe extrañar ya que la cuestión es muy compleja.

El primero se refiere a la fusión de las rocas ígneas. Se sabía que si se calientan en un crisol y luego se dejan enfriar, algunas de las rocas ígneas más comunes, forman vidrios y no rocas cristalinas. Los neptunistas argüían que si las rocas que Hutton suponía habían estado fundidas se hubieran formado realmente por solidificación, se encontrarían en la actualidad formando vidrios y no rocas cristalinas.

La segunda crítica se basaba en que la caliza o carbonato de cal, al ser calentado se descompone dando cal viva y dióxido de carbono. Este hecho era bien conocido de los científicos de Edimburgo, pues lo había descubierto Black, y Hutton afirmaba ahora que las rocas que forman la superficie terrestre habían ascendido en tiempos pasados a la superficie después de haber permanecido enterrados en regiones subterráneas profundas donde prevalecían temperaturas muy elevadas. ¿Cómo se explicaba — preguntaban los críticos — que las calizas no se hubieran descompuesto?

La respuesta de Hutton a ambas objeciones era que las condiciones en las capas profundas de la corteza terrestre eran muy distintas de las que imperaban en la superficie, si bien creía que no se podían reproducir. Parece que Hutton temía que los intentos de refutar experimentalmente tales críticas podían ser contraproducentes si fracasaban. Más adelante advirtió que debían tomarse ciertas precauciones contra los que «forman opiniones de los grandes procesos del reino mineral como consecuencia de haber encendido un fuego y haber examinado el fondo de un pequeño crisol».

Naturalmente, Hall estaba enterado de estos

temores de Hutton pero aun así creyó que valía la pena intentar probar la teoría experimentalmente, y en 1790 llevó a cabo varios experimentos preliminares que suspendió por respeto a las opiniones de su amigo. Cuando Hutton murió en 1797, Hall reanudó sus experimentos.

Empezó con sus *Experiments on Whinstone and Lava* [3], con los que esperaba poder demostrar que cuando una roca ígnea fundida se enfría lentamente produce una roca cristalina y no un vidrio. Empleó el término escocés «whinstone» (arenisca) para rocas que según Hutton eran intrusiones ígneas y la palabra «lava» en el sentido entonces restringido para las rocas arrojadas por un volcán. James Keir [4] ya había demostrado que el vidrio ordinario cristaliza cuando se enfría lentamente. Hall había tenido ocasión reciente de recordarlo al ver en una fábrica de vidrio local el resultado de enfriar lentamente una masa fundida de vidrio verde de botellas, que se había convertido en una masa pétrea; esto le dio buenas esperanzas de éxito. Empleó ocho areniscas y siete lavas distintas, algunas de las cuales había recogido él mismo en el Vesubio y en Sicilia. Calentaba primero cada muestra en el horno de reverbero de una fundición de hierro hasta que la fusión era completa y luego la enfriaba rápidamente, con lo que se formaba un vidrio. Después calentaba de nuevo los fragmentos del vidrio formado hasta fusión y antes de dejarlos enfriar para que se solidificasen, los mantenía a temperatura más baja en un fuego o en un horno de mufla. Hall descubrió muy pronto que regulando la velocidad de enfriamiento podía obtener una masa pétrea más o menos cristalina. Por tanteo encontró cuánto tiempo era necesario mantener la masa cristalina fundida en el horno de mufla; en un experimento menciona un tiempo de doce horas. La conversión preliminar en vidrio era una precaución contra la objeción de que no había calentado las muestras suficientemente para destruír su textura cristalina (Figs. 3 y 4).

Resultaba claro que en todos sus experimentos el producto final daba pruebas de la presencia de cristales. En algunos sólo se observaba una cristalización incipiente; en otros obtuvo rocas que tenían una semejanza superficial con las de partida. El único medio de que disponía para su examen era una lupa; el empleo de secciones delgadas de roca aun no se había descubierto. Afortunadamente, algunos de estos materiales se conservan en el *Geological Museum* de Londres y en el examen microscópico de una muestra se han identificado cristales de feldespato, augita, olivino y mineral de hierro, que son constituyentes típicos de algunas de las rocas fundidas. En otras muestras, aunque se habían formado cristalitas y centros de cristalización, la matriz permanecía vítrea. Parece ser que Hall no consiguió producir ninguna roca con textura cristalina comparable con la de las de partida (Figs. 9–11). Esto no es de extrañar puesto que el tiempo que tardan en enfriarse las rocas ígneas naturales, incluso las lavas, es mucho mayor que el empleado por Hall.

Hall determinó las temperaturas alcanzadas en sus experimentos por medio de las «piezas termométricas» o pirómetros que había inventado Josiah Wedgwood el Viejo para medir temperaturas que por ser demasiado altas no podían registrar los termómetros de la época. Por desgracia, no se pueden convertir los valores de la escala Wedgwood en los de los termómetros corrientes, pero en algunos de sus experimentos los materiales alcanzaron temperaturas superiores al punto de fusión de la plata: 950° C aproximadamente.

Los experimentos de Hall con areniscas y lavas fueron valiosos e interesantes, pero su investigación posterior sobre los efectos de la compresión sobre la acción del calor [5], tuvo mayor trascendencia. Calentó carbonato de cal a temperaturas y presiones elevadas para demostrar que en tales condiciones no se disociaba en cal viva y dióxido de carbono. Esperaba que se formaría mármol cristalino e incluso que llegaría a fundir el carbonato de cal; a tal fin, entre 1798 y 1805 llevó a cabo más de 500 experimentos. Fue un proceso de tanteo que a medida que aumentaba su habilidad experimental le condujo finalmente al éxito. Hall describe sus métodos y sus resultados con tal lujo de detalles que aquí sólo se pueden dar en extracto.

Llevó a cabo sus experimentos con distintas clases de carbonato cálcico; en general, utilizaba creta pulverizada, pero trabajó también con caliza corriente, con mármol y con carbonato de cal químicamente puro. Hall se dio cuenta de que el carbonato de cal natural raramente es puro. Las cantidades que empleaba en un experimento, variaban entre 0,5 y 5 gramos.

Al principio utilizó un recipiente con una tapadera que se fijaba por medio de tornillos, pero muy pronto abandonó este método por otro mucho más sencillo que consistía en el uso de tubos de hierro de ánima muy estrecha cerrados por ambos extremos. Estos tubos eran cañones de escopeta a los que se les cerraba la recámara

soldándoles un tapón de hierro. El carbonato, envuelto en un papel, se colocaba en la recámara y el resto del cañón se llenaba con arcilla cocida y pulverizada. La boca se cerraba con otro tapón de hierro y el extremo del cañón que contenía el carbonato se colocaba en un horno de mufla, mientras la boca, que quedaba fuera, se enfriaba con trapos húmedos (Fig. 6). Uno de los primeros resultados fué la explosión del horno, pero esto no asustó a Hall. Este modificaba continuamente sus aparatos; como no estaba satisfecho con los resultados obtenidos utilizando arcilla pulverizada para llenar el cañón, la sustituyó por un metal fusible que se fundía a la temperatura de ebullición del agua y que podía separarse con facilidad al terminar el experimento. Empleó este método durante bastante tiempo, hasta que se presentó otra dificultad. El metal fusible se difundía a través del cañón de hierro, de donde salía formando un alambre fino. Hall pensó que esto se debía a la presión creada por la expansión del metal, por lo que insertó con el carbonato un tubito abierto por un extremo, que contenía aire que él creyó que amortiguaría la expansión del metal fusible. Este método parece que tuvo éxito cuando encontró, no sin antes haber destruído varios cañones, la cantidad de aire que tenía que emplear. La contaminación del carbonato se evitaba colocándolo en pequeños recipientes tubulares de unos 6 mm de diámetro, que al principio eran de cristal; pero como éste se fundía con facilidad, lo sustituyó por porcelana. Los recipientes se colocaban en un armazón de hierro en el extremo de una barra, de manera que se podían retirar con facilidad al final del experimento (Fig. 6). En ciertas ocasiones empleó plomo en vez de metal fusible; ponía también sílice pulverizada (probablemente pedernal o cuarzo) en el recipiente de porcelana para evitar el contacto entre el carbonato y el metal fusible. La sustitución de los cañones que había utilizado hasta entonces por tubos de porcelana (Figs. 2 y 13) (aproximadamente de 34,5 cm de longitud y 6 mm de calibre y con paredes de 5 mm de espesor), que obtenía de los talleres Etruria de Wedgwood constituyeron una modificación importante. Como material de relleno utilizó también sílice, y el espacio que quedaba en el extremo abierto lo llenó de bórax fundido para evitar fugas, pero los resultados no fueron satisfactorios. Hall sospechaba que los tubos de porcelana eran porosos y utilizó con relativo éxito bórax fundido como esmalte interior. Más tarde, no estando satisfecho con los tubos de Wedgwood, él mismo fabricó otros, que resultaron mejores, con una mezcla de arcilla de porcelana de Cornualles y «piedra de Cornualles» (probablemente caolín), y cambió la posición de los tubos en el horno de mufla, encontrando que era más conveniente colocarlos en posición vertical cuando empleaba bórax como material de cierre (Fig. 2). Al disminuír la cantidad de gas perdido pudo alcanzar presiones más altas.

En 1803 había llevado a cabo 156 experimentos con resultados muy variables; en algunos, las pérdidas de dióxido de carbono fueron muy pequeñas, del orden de 2–3% o quizá menos. En este punto, estaba completamente justificada su conclusión de que el carbonato cálcico calentado a presión no se disocia en forma apreciable, incluso a temperaturas superiores a los 1000° C. Parece también probable que consiguiese convertir el carbonato cálcico pulverizado en algo que se parecía al mármol cristalino (Fig. 12). En un experimento en el que utilizó 80 granos (cerca de 5 gramos) de creta pulverizada, obtuvo una masa compacta semitransparente con la fractura romboidal característica de la calcita. La pérdida en peso fue sólo de 3,5 granos, es decir, menos del 5%.

Hall seguía confiando en que podría demostrar que se podía fundir el carbonato cálcico y decidió aumentar la temperatura y la presión, para lo cual creyó que no eran satisfactorios los tubos de porcelana que había utilizado. Probó de nuevo los cañones de escopeta, que resultaron también inadecuados, y entonces decidió emplear barras de hierro en las que taladraba un orificio para los tubos de porcelana (Figs. 5 y 7). Consiguió un suministro de barras de un hierro de calidad excepcional denominado *Old Sable* importado de Rusia. Su amigo el Dr. Robert Kennedy, químico eminente, le sugirió que en el cañón, junto con el carbonato, introdujera pequeñas cantidades de agua, la cual al vaporizarse aumentaría mucho la presión desarrollada. Hall recogió esta sugerencia e incluso creyó que la podría mejorar utilizando en algunos experimentos carbonato amónico, nitrato amónico, pólvora o papel impregnado con salitre, pero no consiguió mejores resultados que con el agua. Con esos métodos, el carbonato reaccionó con el recipiente de arcilla, formándose varios minerales nuevos que parece llegaron a fundir o se depositaron después de sublimar.

En 1804, Hall anunció que había conseguido fundir el carbonato cálcico, y como se sugirió que esto podía ser debido a las impurezas, decidió utilizar recipientes de platino, metal que sólo

podía obtener en forma de láminas delgadas que doblaba como un papel de filtro, en forma de copa, y adquirió una partida de carbonato de cal químicamente puro preparado especialmente.

Como en sus experimentos con las areniscas, Hall comprobó cuidadosamente las temperaturas alcanzadas por medio de «piezas pirométricas» del tipo inventado por Wedgwood. Aunque es difícil conocer con precisión las temperaturas a que operaba, por fortuna Hall anotó que el 22 de su escala correspondía al punto de fusión de la plata, lo que permite suponer que las temperaturas alcanzadas deberían ser bastante superiores a los 1000° C.

No satisfecho con registrar la temperatura, Hall ideó medios para determinar la presión desarrollada durante sus experimentos, medios basados, según dice, en los empleados por el conde Rumford para medir la fuerza explosiva de la pólvora. Comparado con los actuales, el aparato era muy grosero (Fig. 8), pero le permitió obtener valores aproximados. La presión se deducía del peso elevado por la expansión de los gases generados en los tubos de compresión durante el experimento. El máximo registrado fue de 270 atmósferas, pero en su mayor parte fueron mucho más bajas; Hall calculó que dicho valor era equivalente a una columna de agua de mar de 2720 m de altura, ya que lo que le interesaba era encontrar la presión ejercida sobre las rocas enterradas a grandes profundidades debajo del mar o de una capa de roca.

Hall consiguió la mayor parte de sus propósitos. Estableció de manera cierta que el carbonato cálcico no se disocia cuando se calienta bajo presión; desde el punto de vista geológico éste fue su éxito más importante. Parece que también consiguió convertir la creta o caliza pulverizada en algo muy parecido al mármol cristalino verdadero, lo que arrojó luz sobre las condiciones de formación de ciertos mármoles naturales. Se ha puesto en duda que consiguiera fundir el carbonato cálcico. No es posible sacar ninguna conclusión de sus descripciones, pues en los experimentos en que sostiene haberlo conseguido no menciona ninguna prueba, como la efervescencia con los ácidos, que hubiera podido establecer la naturaleza de la sustancia fundida. Incluso con las disponibilidades de un laboratorio moderno es difícil fundir carbonato cálcico y no hay constancia inequívoca de que se consiguiera hasta 1912, cuando H. E. Boeke lo efectuó a una temperatura de 1289° C y 110 atmósferas de presión [6]. Es posible que Hall alcanzara las condiciones necesarias en algunos de sus experimentos, pero nunca se podrá saber con certeza. Lo que sí se puede afirmar sin miedo a contradicción es que Hall llevó a cabo una hazaña muy notable para un aficionado del siglo XVIII, hazaña de valor permanente para la geología. Hall merece figurar por lo tanto como precursor distinguido en la historia de la química física.

Los resultados de Hall atrajeron la atención de la época, tanto en su país como en el extranjero, y se ha hecho frecuente referencia a los mismos desde entonces. En 1807 se publicó en Ginebra una edición francesa de sus experimentos sobre compresión, traducida por Marc-Auguste Pictet, eminente científico suizo que en un prefacio encomiástico comparó Hall a Lavoisier [7].

Después de completar los experimentos que hemos descrito, Hall continuó sus estudios geológicos y publicó varios trabajos de interés. Merece también mencionarse que sus trabajos lo muestran no sólo como un geólogo experimental sino también como un prospector competente. En 1806 fue elegido *Fellow* de la *Royal Society*, y en 1812 llegó a ser el segundo Presidente de la *Royal Society* de Edimburgo, cargo que desempeñó hasta 1820. Murió el 23 de junio de 1832 en Edimburgo, después de varios años de enfermedad.

El autor desea expresar su agradecimiento al Director del *Geological Survey and Museum* de Londres por haberle permitido reproducir las ilustraciones del aparato original de Hall, propiedad del Museo, así como al Consejo de la *Royal Society* de Edimburgo por permitir la reproducción del retrato de Hall y de las restantes ilustraciones que figuran en las descripciones de sus experimentos en los volúmenes V y VI de las *Transactions* de la Sociedad.

REFERENCIAS

[1] MacGregor, M. *Endeavour*, **6**, 109, 1947.
[2] McKie, D. *Notes roy. Soc. Lond.*, **7**, 13, 1949.
[3] Hall, Sir James. *Trans. roy. Soc. Edinb.*, **5**, 43, 1805.
[4] Keir, J. *Phil. Trans.*, **66**, 530, 1776.
[5] Hall, Sir James. *Trans. roy. Soc. Edinb.*, **6**, 71, 1812.
[6] Clarke, F. W. *Bull.* 770 *U.S. geol. Surv.* (5a edición), 563, 1924.
[7] Pictet, M. A. «Description d'une suite d'expériences qui montrent comment la compression peut modifier l'action de la chaleur», pág. IX. Ginebra. 1807.

Los terrenos turbosos boreales

H. SJÖRS

Los terrenos turbosos boreales son típicas formaciones de los países circumpolares con suelos drenados y cubiertos principalmente de bosques de coníferas, que poseen estructuras realmente sorprendentes. Para determinar su origen, aún no bien conocido, son necesarias amplias investigaciones. El presente artículo describe e ilustra cuanto hoy sabemos acerca de su formación.

Desde hace tiempo se sabe que los terrenos turbosos septentrionales presentan distribuciones muy peculiares, caracterizadas por la alternancia de zonas secas y zonas pantanosas. Aún no se ha aclarado la causa de tales distribuciones, quizá por hallarse en regiones poco accesibles, según ya Linneo hizo observar gráficamente [1], o quizá por falta de coordinación entre científicos que se expresan en idiomas diferentes. Al fin, la aviación y la fotografía aérea vienen a dar impulso a su estudio, pues facilitan la visualización de amplios países, delatando bien los esquemas de distribución. Hoy es razonable presentar una revisión general del problema.

Con vistas a estudios detallados de hidrotopografía e hidrodinámica es útil el análisis local y regional de los esquemas de distribución de las turberas, si bien el problema no es exclusivamente geomorfológico, pues cualquier concepción que abarque el estado, desarrollo y origen de las estructuras que forman dichos esquemas, ha de basarse también en estudios ecológicos, partiendo de la vegetación actual y sus condiciones ambientales y reconstruyendo el pasado por medio del análisis estratigráfico detallado de la turba.

LA ZONA BOREAL

Es la zona septentrional casi circumpolar con suelos drenados recubiertos sobre todo por bosques de coníferas [2]. Los terrenos turbosos típicos no son exclusivos de dicha zona geográfica, pero abundan muchísimo más en ella que en todo el resto del globo. El bosque boreal o «taiga», se extiende desde Trondheim al mar de Okhotsk y desde Alaska a Terranova (Fig. 13). Quedan excluídos los bosques de pinos oceánicos, como los de Escocia, Oeste de Noruega y países del Pacífico, así como los numerosos tipos de bosques no coníferos. Es posible subdividir la zona boreal con arreglo a la distribución de los árboles forestales, pero es de más general valor ecológico la subdivisión en zonas latitudinales: una primera de transición al Sur, que pasa gradualmente bien a bosques de deciduas, bien a estepas. La segunda zona, que es la auténticamente boreal, ha sido subdividida en dos por los autores rusos (taiga meridional y taiga septentrional) [3]: la subártica, o «taiga septentrional», queda separada de las regiones árticas desarboladas por una franja generalmente estrecha de tundra arbolada. Puede hablarse también de una zonación altitudinal dentro de las comarcas montañosas de la zona boreal aproximadamente paralela a la citada zonación latitudinal, aunque no equivalente, por complicarse con la presencia de bosques de abedules más o menos subalpinos, sobre todo en Fenoscandia y Kamchatka.

La división en zonas y subzonas está estrechamente ligada a la duración del período vegetativo pero poco a las temperaturas invernales. En toda la zona boreal las temperaturas invernales son siempre inferiores a 0° C permaneciendo helada la superficie del suelo durante bastantes meses. La congelación persistente de capas profundas de suelo (*permafrost*) es un fenómeno que se da sólo en la parte más continental de la zona boreal, allí donde las temperaturas de invierno llegan a ser excesivamente bajas. Algunas estructuras y distribuciones de terrenos turbosos están sin duda relacionadas con el tipo de helada, pero otras veces no es así. Las distribuciones en las áreas de congelación permanente deben ser estudiadas aparte.

La vegetación no guarda relación con la congelación permanente [4]. Así, en Europa y el Labrador hay tal congelación en partes discontinuas de la zona subártica. En otras partes del Canadá y en Siberia occidental se hallan manchas discontinuas de congelación hasta la zona boreal misma, aunque la mayoría se encuentra en el subártico; en las regiones más continentales la congelación es continua y penetra en plena zona de bosques. En la Siberia oriental y central, una congelación continua y profunda invade toda la zona boreal, incluso rebasándola por el Sur.

FIGURA 1 – *Terrenos turbosos con flora minerotrófica. Islotes con denso recubrimiento de abeto negro* (Picea mariana). *Todas las fotografías de esta página se refieren a la baja llanura de la Bahía de Hudson, al Norte de Ontario.*

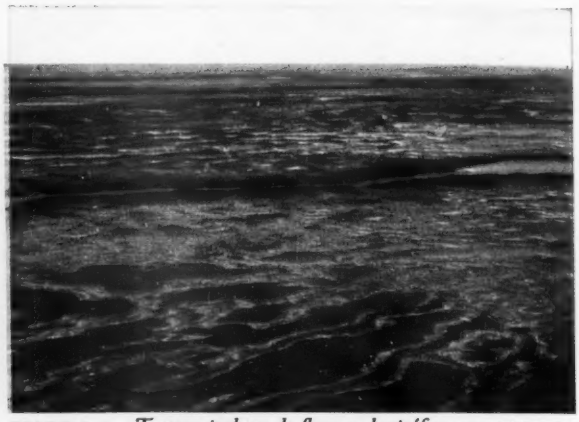


FIGURA 2 – *Terreno turboso de flora ombrotrófica con numerosos pozos. Un arroyo corre entre dos pozos y termina en una charca de castores (a la derecha).*

FIGURA 3 – *A la izquierda, terreno de flora ombrotrófica, cuyo color resulta principalmente de* Sphagnum rubellum. *A la derecha, terreno de flora minerotrófica; su color verde es debido en parte a alerces enanos. En el centro, islotes de abeto negro.*

FIGURA 4 – *Islotes de abeto negro grande y de forma en parte anular, en medio de terreno turboso minerotrófico recubierto por alerces enanos* (Larix laricina).

FIGURA 5 – *«Flarks» de gran tamaño, aún recubiertos de aguas de deshielo y separados por elevadas crestas, en parte con abetos negros. Parecen arrozales.*

FIGURA 6 – *Lago formado probablemente por coalescencia de varias fosas. Distribución típica de areas llanas que son divisorias de cuencas fluviales.*

FIGURA 7 – *Terreno turboso de flora ombrotrófica con hoyas. Pinos silvestres con dominantes de* Calluna, Betula nana, *y* Eriophorum vaginatum. *En los bordes de las aguas,* Scheuchzeria palustris *y* Carex limosa. *Tisjökölen, Suecia central.*

FIGURA 8 – *Terreno turboso de flora ombrotrófica con crestas elevadas y algunas hoyas. Entre las crestas principalmente* Trichophorum caespitosum. *Primer término arenoso, con líquenes* Cladonia *y pinos. Lofsdalen, altiplanicies de Suecia central.*

FIGURA 9 – *Zona de ladera bastante copiosamente irrigada por aguas de moderado contenido mineral. En primer término,* Molinia caerulea. *Sävsnäs, altiplanicies de Suecia central.*

FIGURA 10 – *Dos «flarks» separados por un cordón de césped firme pero poco elevado de* Carex *y* Molinia. *En los «flarks» hay* Carex rostrata, C. livida *y* Rhynchospora alba. *Aguas abajo del paraje representado en la Fig.* 9.

FIGURA 11 – *«Palsa» de 3 metros de altura en la parte subártica de la baja llanura de la Bahía de Hudson. Se ven abetos negros deformados por el viento. Los recubrimientos de líquen (ante todo* Cetraria nivalis) *delatan trechos sin cubierta nívea.*

FIGURA 12 – *Algunas palsas son erosionadas por vientos y lluvias, produciéndose entonces la fusión del centro congelado. La charca marca probablemente el sitio de una palsa completamente borrada. En la misma comarca que la de la Fig.* 11.

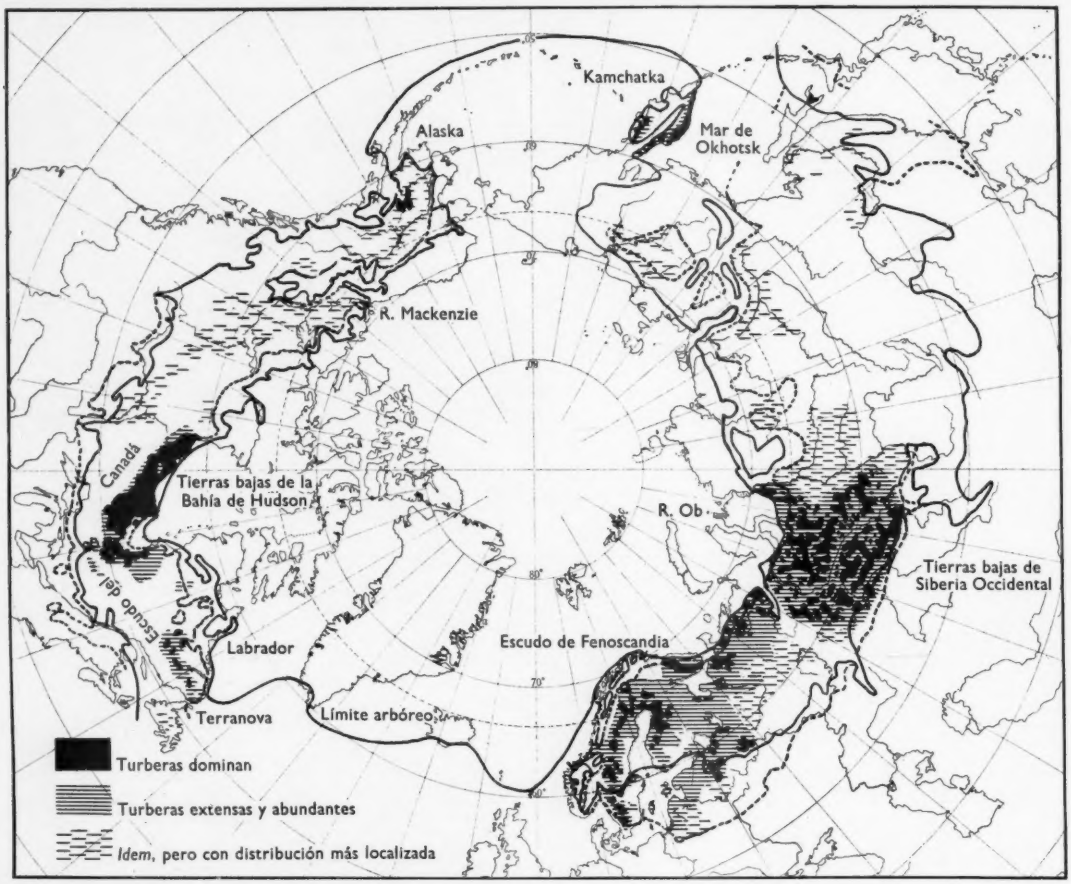


FIGURA 13 – *Región con abundante terreno turboso de la zona boreal. Al Sur (o por debajo) del límite de árboles se extiende la tundra arbolada o las areas subalpinas hasta el límite norteño discontinuo. Al Sur de la zona boreal hay comarcas de transición que llegan hasta la linea discontinua meridional.*

La zona boreal, como otras regiones bióticas, no tiene una vegetación uniforme. Los bosques boreales (que en parte crecen sobre terrenos turbosos) varían menos que los de latitudes más bajas, pero cabe ya distinguir en aquellos cierta diversidad debida a clima, estado de desarrollo, suelo, agua edáfica y acción del hombre. Los tipos más comunes de superficie desarbolada son pantanos y marjales, que cubren un área insospechada para quien no los vea desde el aire.

PORCENTAJE DE TERRENO TURBOSO

La gran mayoría de los terrenos turbosos del globo está situada en la zona boreal, aunque la diferente fisiografía de los países boreales determina muy distintos porcentajes en cada uno de ellos. Al Sur de la Bahía de Hudson existe una llanura tan extensa como la Gran Bretaña, cubierta casi sin interrupción por suelo turboso húmedo excepto en donde hay lagos y lechos fluviales [5]. Hay también extensiones considerables de turberas en Alaska [6] y Labrador [7].

En Rusia la distribución es desigual [8]. Toda la amplia región de Siberia occidental comprendida entre los ríos Ob e Irtysh constituye el más extenso país de turba del mundo. También abundan terrenos turbosos en Kamchatka y al Norte de Rusia Europea.

La tercera parte de Finlandia está cubierta de turberas [9], proporción máxima. En algunas regiones finlandesas se llega al 60–70%; también hay más del 50% en ciertas partes de Suecia, donde aproximadamente el 20% de la zona boreal está cubierta de turba. En los citados países sólo muy pocas manchas de turba adquieren considerable extensión (ejemplo la Sjaunja, en

Laponia, con 390 km²); la mayoría de los suelos turbosos escandinavos se descomponen en multitud de pequeños retazos, debido a la falta de extensas llanuras ininterrumpidas.

El tipo de terreno turboso depende también del relieve y clima, aunque la importancia de éste se había sobreestimado; hoy se sabe que se dan dentro y fuera de la zona boreal tipos muy diferentes de terrenos turbosos con climas prácticamente idénticos.

LA NUTRICION DE LA VEGETACION DE TURBA

El aporte mineral llega a la turba desde la atmósfera o desde el subsuelo. El aporte atmosférico, que beneficia igualmente a todas las turberas, consiste ante todo en precipitaciones y en polvo. El aporte del suelo, en cambio, varía muchísimo y en algunos terrenos turbosos es nulo. Las regiones turbosas que dependen exclusivamente de aportes atmosféricos se denominan «ombrotróficas» [10], es decir, «alimentadas por las lluvias». Las que reciben además aporte mineral terrestre, se llaman «minerotróficas». En éstas el vehículo de los minerales es el agua.

En regiones oceánicas como la Gran Bretaña occidental e Irlanda occidental, la nutrición ombrotrófica es solo un poco inferior a la débil nutrición minerotrófica, variando poco la vegetación. Pero siendo la zona boreal en su mayor parte de carácter continental o subcontinental, la nutrición ombrotrófica que en ella priva resulta muy pobre, en especial por lo que se refiere a sales marinas. Al disminuir la concentración de nutrimentos minerales en el agua de lluvia se hacen, naturalmente, más marcadas las diferencias entre las turberas ombrotróficas y minerotróficas.

Por otra parte, los suelos y aguas corridas boreales tienen tal carácter que gran parte del agua edáfica que llega a las turberas sólo ha estado en contacto con capas muy pobres o lixiviadas, o ha sido diluída por gran cantidad de agua casi pura de lluvia; en consecuencia, los países boreales poseen muchos terrenos turbosos que sólo permiten una ligera o dudosa minerotrofía. Esto es lo que ocurre al menos en los terrenos del escudo canadiense y fenoscándico, armados en rocas arcaicas o precámbricas.

No faltan comarcas de rica minerotrofía. Donde los suelos tienen un componente calizo ocurre un enriquecimiento en calcio (aunque por lo regular no en otros principios nutritivos), resultando turbas calcáreas, alcalinas o, al menos, casi neutras. En otros lugares, casi todas las turbas minerotróficas son más o menos ácidas; algunas de ellas tanto como las ombrotróficas.

Sin embargo, la acidez, no es una simple función del aporte mineral. También es importante al respecto la velocidad de formación de la turba misma. En parajes inundados, con turba de formación más lenta, se observan menores acideces.

El crecimiento vegetal y la producción orgánica por fotosíntesis son procesos más lentos en el Norte, con su reducido período vegetativo; en cambio, la velocidad de descomposición de la turba en parajes inundados parece mayor en el Norte. Puede ser importante la más alta solubilidad del oxígeno en agua a bajas temperaturas, aunque probablemente el factor principal sea el vigoroso desarrollo que alcanzan las algas en dichos parajes inundados. Las algas entran en reñida competencia con los musgos formadores de turba; las primeras también producen mucho oxígeno fotosintético, de modo que la nueva materia orgánica formada se descompone prontamente y no se acumula nueva turba. Los restos de otras plantas y la turba residual pueden sufrir un tipo muy activo de oxidación superficial húmeda que se superpone a la descomposición normal. Se ha comprobado [11] que durante 2000–3000 años no se formó ninguna turba en ciertas areas inundadas del interior llamadas allí «flarks».

PRINCIPALES COMUNIDADES VEGETALES

Mucho se ha escrito sobre florística y ecología de la vegetación de las turberas boreales [9, 10, 12]. La mayoría de las plantas de esas turberas prosperan sólo minerotróficamente; pocas son las especies capaces de vegetar en condiciones rigurosamente ombrotróficas; ésas viven también en parajes de minerotrofía. Las turberas apenas minerotróficas (y de gran acidez) soportan ya una flora mucho más rica que la de las estaciones ombrotróficas, compuesta a base de *Carex*, *Eriophorum*, *Sphagnum* (el musgo de la turba), *Menyanthes trifoliata*, algunos sauces (*Salix*) y otras. Turbas alcalinas o casi neutras poseen ya una flora francamente variada y de aquí su nombre de «fens ricos» [10].

La diferente vegetación que recubre areas ombrotróficas y areas minerotróficas produce desde lejos distintas tonalidades, pudiéndose distinguir así unas y otras en las fotografías aéreas en color (Fig. 3). En fotografías en negro no se aprecían diferencias de tono pero si de estructura, y así es posible distinguir también unas regiones de otras. Se dan otras variaciones de vegetación en las turbas boreales [6, 7, 9, 12], que dependen de

diferencias climáticas, o del grado de consistencia y humedad.

Características del terreno turboso boreal son las áreas de excesiva humedad y apantanamiento, donde hay abundancia de algas y escasea la vegetación mayor. Dichas áreas suelen tener gran extensión, casi siempre poseen límites nítidos, y están cubiertas regularmente de agua al tiempo del deshielo y en otros períodos de lluvia. Forman la parte más característica de los esquemas de distribución y parecen tener estabilidad y persistencia. Esto se ha demostrado mediante análisis polínicos estratigráficos [11]. Rara vez se ven invalidadas dichas áreas por vegetación turbógena de cierto vigor. Esta ausencia de recolonización y formación de nueva turba se explica por el desarrollo que alcanzan las algas y por el efecto «corrosivo» de la oxidación superficial.

Las esquemas de distribución de los terrenos turbosos boreales forman dos grupos: uno sin congelación permanente y otro con ella. Estudiamos separadamente ambos tipos.

ESQUEMAS DE DISTRIBUCION EN REGIONES SIN CONGELACION PERMANENTE

En los marjales ombrotróficos, los viejos cenagales se perpetúan y tienden a quedar a un nivel más bajo que el del marjal circundante a medida que la turba crece en éste; a la larga quedan convertidos en hondos pozos secundarios [11, 13]. Son corrientes los de profundidades que oscilan entre uno y tres metros, por ejemplo en Suecia [11, 13] (Figs. 7 y 8), en el norte de Ontario [5] y en Quebec (Fig. 2). No son privativos de los marjales boreales. Recientemente se han descrito buenos ejemplos — que sin duda tendrán similar historia — en el Silver Flowe, al SW de Escocia [14]. Otros ejemplos de terrenos turbosos no boreales con buenos esquemas de distribución se encuentran al norte de Minnesota [15]. Dentro de la zona boreal las distribuciones más características se producen en turberas minerotróficas, debido a la riqueza de las venas superficiales y subsuperficiales.

Todo «flark» se extiende horizontalmente, aunque su longitud alcance centenares de metros. En las laderas, los «flarks» no pasan de unos pocos metros de anchura, pero en los terrenos turbosos perfectamente llanos sobrepasan los cien metros.

La vegetación de los «flarks» revela notable uniformidad por toda la zona boreal, debido a que sus componentes principales son circumboreales: diversos *Carex* como *C. limosa*, *C. chordorrhiza*, *C. livida*, además de *Eriophorum angustifolium*, *E. gracile*, *Menyanthes trifoliata*, *Scheuchzeria palustris*, *Equisetum fluviatile*, *Juncus stygius* y algunas otras especies. Ignoramos aún por qué todas estas plantas genuinamente estolonígenas, crecen tan ralas en los «flarks». La nutrición de que disponen es pobre, pero al parecer no inferior a la de otras partes de los terrenos turbosos donde, sin embargo, prospera una densa vegetación. Todas estas plantas disponen de tejidos internos de aireación y no tienen por qué acusar la falta de oxígeno en los niveles radiculares.

El eje longitudinal de los «flarks» se dispone siempre en ángulo recto con respecto a la línea de pendiente, como una curva de nivel. El hecho es característico de todas las distribuciones turbosas no dependientes de la congelación ni de los fuertes vientos. Se escalonan «flarks» consecutivos en las pendientes aunque éstas sean muy suaves, de forma que donde abundan dan la impresión de arrozales en terrazas (Fig. 5). Además, los conjuntos de «flarks» se sitúan precisamente en aquellas partes del país turboso por donde las aguas marchan pendiente abajo.

Lo dicho demuestra que los «flarks» dependen ante todo de trasiegos hídricos a través del terreno turboso. Otras explicaciones aducidas sobre su formación quedan así descartadas. No parece, por ejemplo, que resulten por deslizamientos del suelo pendiente abajo, pues entonces los «flarks» serían más propios de fuertes laderas y faltarían en los llanos, cuando, por el contrario, los más notables «flarks» se hallan en pendientes tan suaves que es imposible concebir en ellas deslizamientos de turba (Figs. 5, 10) y faltan en las pendientes acentuadas (Fig. 9).

Hay pruebas [11] de que la turba crece mejor entre los «flarks» que dentro de ellos. Es lógico que así sea, habida cuenta de la al parecer precaria estabilidad del sistema del «flark». Otro requisito es que los bordes de contención del agua no sean erosionados. La erosión natural tiene, sin duda, carácter excepcional y sólo se manifiesta en aquellas laderas demasiado inclinadas para la formación de «flarks». Cuando actúa la erosión desaparece el esquema de distribución.

Hacia las partes subárticas de la zona boreal los «flarks» tienden a ser muy grandes. Allí se ven limitados por marcadas crestas de 70–90 cm de altura, con líquenes, matas achaparradas, y pequeños arbolillos esporádicos. Debe ser la presión del hielo, ejercida horizontalmente en la época de las congelaciones de comienzos del invierno, lo que determina el crecimiento vertical de esos bordes [17]. Un fenómeno análogo se conoce

en lagos de climas muy fríos, donde el hielo apila piedras y tierra formando una cresta de sedimentos a lo largo de las orillas. La expansión del hielo es debida a los cambios de temperatura; al contraerse con el frío se originan numerosas grietas que se llenan de agua que, a su vez, se hiela inmediatamente. Al ascender de nuevo la temperatura el hielo se expande y ejerce su presión sobre los bordes de la cuenca. Las crestas aún no heladas entre «flark» y «flark» son entonces elevadas por la presión de los hielos contenidos en los «flarks». Dichas crestas se hielan más tarde, y luego, en primavera, permanecen también mucho más tiempo heladas.

Aunque la presión de los hielos explique la elevación de las crestas limitantes, no son probablemente la causa formativa de los «flarks», ni de su peculiar distribución, pues son frecuentes los separados por crestas muy suaves. En conclusión, a pesar de que la pseudoestabilidad hidrodinámica no explica cabalmente el origen de los «flarks», es preciso tener en cuenta las condiciones hidrodinámicas en toda hipótesis digna de crédito.

ESQUEMAS DE DISTRIBUCION EN REGIONES DE CONGELACION PERMANENTE

La congelación permanente aparece primero en ciertos montículos secos que por acción de la congelación misma van elevando su propio nivel. Se conocen varios tipos de montículos levantados y helados, designándose los principales con los nombres de «islotes de abetos» y «palsas».

Los islotes de abetos se encuentran en Alaska y en el interior del Canadá (Fig. 1). Cerca del límite sur de la congelación discontinua, donde el clima es aún favorable para el desarrollo arbóreo, se hallan dichos islotes a menudo bastante extensos, aunque medianamente elevados, recubiertos por rodales muy densos de abeto negro (*Picea mariana*) (Fig. 4), especie que se adapta bien a esos montículos de turba congelada, debido a que no necesita mucho suelo para sus raíces ni principios nutritivos; además, ese abeto tolera alta acidez y se reproduce profusamente por estolones radicales que van quedando embutidos en un lecho de musgo y líquen.

Más al Norte los montículos soportan sólo esporádicos arbolitos (en el Canadá abeto negro y *Larix laricina*). Durante el invierno la nieve que los cubre es barrida por el viento y quedan completamente expuestos a los fríos. Montículos parecidos — a menudo sin ningún arbol — se encuentran en la Rusia septentrional y en Fenoscandia [9, 18], donde se conocen con el nombre de «palsas» (Fig. 11). Allí suelen ser de pequeño tamaño, pero alcanzan hasta 7 m de altura en el extremo Norte de Suecia y Finlandia, y más aún en Rusia. Entre palsa y palsa las heladas son sólo estacionales y el suelo acostumbra a permanecer muy húmedo en verano.

En el interior de las palsas alternan capas de turba helada y hielo puro [18], creyéndose que el agua se acumula sobre los cristales de hielo en proceso de crecimiento. Este agua, que procede de debajo o de los contornos, aumenta el volumen de la palsa. A menudo es erosionada hasta desaparecer por completo, siendo reemplazada por una fosa de agua (Fig. 12).

Donde la congelación es continua, no hay palsas, sino extensas mesetas de turba, de poco relieve, con polígonos de hielo y otras distribuciones muy diferentes de las descritas en las turberas boreales no congeladas. También hay, aquí y allá, amontonamientos de hielo y turba helada siempre que existan aguas líquidas. Son los «pingos», a veces imponentes, de las proximidades del ártico; los famosos del delta del río Mackenzie [19] son tan grandes como un gran edificio.

HISTORIA

Muy pocos terrenos turbosos boreales se originaron a partir de lagunas colmadas por vegetación, pero probablemente esas lagunas servirían de punto de partida para la expansión de terrenos turbosos por los suelos minerales. Otros focos precoces pudieran haber sido los parajes de actividad de los castores, antaño abundantísimos en estas latitudes. Con sus presas, estos animales empantanan las márgenes de ríos y arroyos, haciendo perecer los árboles forestales y provocando la invasión de la vegetación de turba.

La mayoría de las turberas boreales yacen directamente sobre suelo mineral que anteriormente soportó bosque, o al menos matorral o vegetación arbórea palustre. Es improbable que al comienzo del período glacial hubiera mucho terreno turboso en la zona boreal, excepto, quizá, en áreas no glaciares. Sorprende la uniformidad de terrenos turbosos en tan distantes países, habida cuenta del origen moderno de dichos terrenos y de sus comunidades vegetales (especialmente los tipos vegetales acidófilos). Es probable que la mayoría de las especies vegetales sean antiquísimas, pero no así su agregación en la comunidad vegetal característica de la turba, esto al menos en lo que concierne a la actual zona boreal. Los terrenos turbosos se expandieron rápidamente en el período posglacial intermedio. Más tarde la expansión

fue haciéndose más lenta. Hoy día no hay peligro de desforestación por esta causa, al menos en Fenoscandia [20].

La mayoría de las estructuras descritas no debieron existir en fases precoces de la historia de estos terrenos, y debieron surgir en milenios más recientes. Análisis polínicos demuestran edades de 2000–3000 años para estructuras existentes en las altas regiones de Suecia central; edades parecidas se deducen para las palsas subalpinas del extremo Norte de Suecia. Es de esperar que gracias al radiocarbono conozcamos pronto datos más precisos.

La sucesión vegetal de los terrenos turbosos es bastante más complicada que la clásica sucesión de estación húmeda descrita en textos de fitosociología. La sucesión inversa es más frecuente: aquella en que se parte de suelo mineral, y con un aumento creciente de humedad, se llega a la transformación local en «flarks» o fosas secundarias.

También debió ocurrir localmente un desarrollo alternativo al expandirse y confluir unas con otras las fosas adyacentes hasta formar lagos, por ejemplo en ciertas comarcas de la Bahía de Hudson (Fig. 6). Procesos constructivos y destructivos se acusan también en estructuras turbosas de las zonas de congelación permanente.

El desarrollo de los terrenos turbosos septentrionales difícilmente puede compaginarse con una teoría uniforme del «climax». Lejos de conducir a la uniformidad, los empantanamientos y cambios posteriores han dado lugar a una mayor diversificación de habitats y de sus vegetaciones. La misma formación de los esquemas de distribucion descritos parece contradecir cualquier concepto de «climax», e incluso el punto de vista más cauteloso del «policlimax».

El sujeto biológico, con su congénita tendencia a expandirse al azar, es compelido hacia tipos estructurales muy determinados por la acción de los agentes externos y su propia evolución interna. Surgen así incontables variantes, aunque sorprende la tendencia hacia un prototipo determinado, que de hecho nunca existe. Y así, los biólogos quedan tan desorientados como fascinados.

REFERENCIAS

[1] LINNAEUS, C. «Iter lapponicum». Varias ediciones póstumas en sueco. Edición inglesa por Sir James Smith, 1811 («Lachesis Lapponica»). Véase también JAMES, W. O., *Endeavour*, **16**, 107, 1957.

[2] HARE, F. K. *Geog. Rev., New York*, **40**, 615, 1950; *Geog. Studies, London*, **1**, 4, 1954; *Canada, Dept. Mines Tech. Surv., Geog. Branch*, mem. **6**, 1959.

[3] LAVRENKO, E. M. y SOCHAVA, V. B. (Compiladores). Растительный покров (La vegetación de la URSS). 2 vols., texto para el mapa geobotánico de la URSS, (Геоботаническая Карта СССР), por los mismos compiladores (1954), Academia de Ciencias de la URSS, Moscú y Leningrado. 1956.

[4] BROWN, R. J. E. *Arctic*, **13**, 163, 1960.

[5] COOMBS, D. B. *Geog. Bull., Ottawa*, **6**, 1, 1954.
HUSTICH, I. *Acta Geog., Helsingf.*, **16**, Parte 1, 1957.
SJÖRS, H. *Arctic*, **12**, 2, 1959; *Bull. Nat. Mus. Can.*, **171**, 1, 1961; *ibid.* (En preparación.)

[6] DRURY, W. H. *Contr. Gray Herb. Harv.*, **178**, 1956.

[7] ALLINGTON, K. R. *McGill Sub-Arctic Res. Pap., Montreal*, 7, 1959 (Tesis). Véase también [2].

[8] GALKINA, E. A. En [3], Vol. II, pág. 553.

[9] RUUHIJÄRVI, R. *Ann. bot. Soc. 'Vanamo', Helsingf.*, **31**, Parte. 1, 1960.

[10] DU RIETZ, G. E. *Svensk bot. Tidskr.*, **43**, 274, 1949; *Vegetatio, Haag*, 5–6, 571, 1954.

[11] LUNDQVIST, G. *Sveriges geol. Unders.*, **Ca 21**, 1951.

[12] CAJANDER, A. K. *Acta for. fenn.*, **2**, 1913.
MALMSTRÖM, C. *Medd. Skogsförsöksanst. Stockh.*, **20**, 1923.
KOTILAINEN, M. J. *Wiss. Veröff. Finn. Moorkulturver.*, **7**, 1928; *ibid.*, **19**, 1951.
PAASIO, I. *Acta for. fenn.*, **39**, 1933.
SJÖRS, H. *Ark. Bot.*, 33A, Parte 6, 1946; *Acta phytogeogr. Suec.*, **21**, 1948; *Bot. Notiser*, 1950, 173, 1950; *Oikos*, **2**, 241, 1950.
GORHAM, E. *Quart. Rev. Biol.*, **32**, 145, 1957.

[13] GRANLUND, E. *Sveriges geol. Unders.*, **C 373**, 1932.

[14] RATCLIFFE, D. A. y WALKER, D. *J. Ecol.*, **46**, 407, 1958.

[15] H. E. WRIGHT y M. L. HEINSELMAN. Información inédita.

[16] HAMELIN, L.-E. *Cahiers Géog., Québec*, **2**, 87, 1957.

[17] AUER, V. *Acta for. fenn.*, **12**, Parte 2, 1920.

[18] LUNDQVIST, G. *Geol. Fören. Stockh. Förh.*, **73**, 209, 1951.

[19] PORSILD, A. E. *Geog. Rev.*, **28**, 46, 1938.

[20] MALMSTRÖM, C. *Medd. Skogsförsöksanst. Stockh.*, **26**, 1, 1931.

El positronio

F. F. HEYMANN

En este artículo se describen la historia y situación actual de las investigaciones sobre el positronio, un complejo de vida brevísima formado por un electrón y un positrón, con ciertas propiedades semejantes a las del hidrógeno y que en ciertos aspectos puede considerarse como el más liviano de los elementos; reacciona con los halógenos formando compuestos similares a los hidrácidos del hidrógeno, y cada línea de su espectro óptico tiene su correspondiente — con longitud de onda mitad — en el espectro del hidrógeno. El positronio entronca la física y la química, necesitando las técnicas de ambas para su estudio.

ELECTRONES Y POSITRONES

La ecuación de ondas de Schrödinger, que especifica el comportamiento ondulatorio de una partícula elemental, es aplicable sólo cuando la velocidad de ésta es despreciable respecto de la de la luz. La existencia de un electrón con carga positiva fue una de las predicciones más sorprendentes que resultaron cuando Dirac (1930) desarrolló una ecuación de ondas teniendo en cuenta las consecuencias de la teoría especial de la relatividad. Dos años después, Anderson observó efectivamente en una cámara de niebla la huella de esta partícula, conocida ahora como el positrón.

Se dedujo de la teoría de Dirac y de la electrodinámica cuántica, y ha sido bien comprobado experimentalmente, que electrones y positrones pueden ser creados en pares en diversas circunstancias favorables y, al revés, que el choque de un positrón y un electrón puede conducir al aniquilamiento de ambas partículas, convirtiéndose en radiación electromagnética en forma de rayos gamma, la energía asociada con sus masas y movimientos.

Los electrones y los positrones son partículas que pueden considerarse como cargas eléctricas que giran sobre su propio eje al modo de una peonza. Una consecuencia natural de dicha rotación es la de que ambas partículas poseen un campo magnético que en un positrón está dirigido opuestamente al de un electrón que gire en el mismo sentido. Al impulso angular o momento del impulso de estas partículas se le llama su espín.

El espín, como momento del impulso, está sujeto a ciertas reglas cuánticas bien establecidas, una de cuyas importantes consecuencias es la de que cuando se aproximan entre sí un electrón y un positrón, sus ejes de espín pueden ser únicamente paralelos o antiparalelos. A estas dos posibles situaciones se les conoce como estados de triplete y de singlete respectivamente.

Según el principio de la conservación del impulso angular puede probarse que cuando se aniquilan entre sí un positrón y un electrón por choque frontal en el estado de singlete, toda la energía inicial se convierte en dos fotones gamma emitidos en sentidos que distan 180° cuando se usan las coordenadas del c.m. (aquéllas en las que el centro de masas de las partículas iniciales está en reposo). Si las partículas se mueven relativamente despacio antes del choque, la energía que interviene es en esencia precisamente la asociada con las masas en reposo de ambas partículas. En cifras: cada fotón gamma tendrá una energía de 0,511 MeV.

En el caso de un choque frontal con aniquilación en el estado de triplete, puede probarse que han de producirse tres rayos gamma, que están en un mismo plano en el sistema c.m. de coordenadas y cuya energía sumada es 1,022 MeV, pero la de cualquiera de ellos está distribuida estadísticamente en un espectro continuo (Fig. 1). Con la misma representación, la radiación de aniquilación

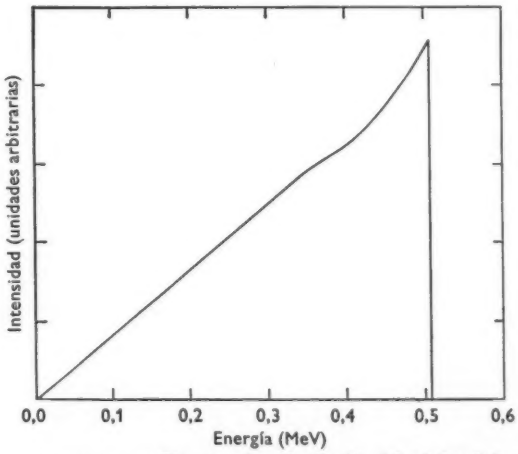


FIGURA 1 – *Espectro de aniquilación del triplete* [5].

de un singlete sería un espectro con una sola línea, en 0,511 MeV.

En los choques oblicuos rara vez habrá aniquilación; los dos casos anteriores son los únicos de importancia práctica.

La probabilidad de un choque de triplete con aniquilaciones es sólo 1/1120 de la del caso de singlete, o sea que las aniquilaciones de tripletes representan muy poco respecto del ritmo a que se aniquilan los positrones en choques libres cuando atraviesan una nube de electrones cuyos ejes de espín están orientados al azar. Sin embargo, la pequeñez de la probabilidad de aniquilación en el caso de triplete es realmente la característica que permite estudiar el positronio, como veremos luego.

LA NATURALEZA DEL POSITRONIO

Hasta aquí hemos admitido tácitamente que electrón y positrón desaparecen tras un choque frontal libre. Aunque el destino final de todo positrón es aniquilarse con un electrón, es verdaderamente afortunado para el investigador que el camino que lleva a la desaparición del positrón siga con frecuencia una trayectoria menos directa.

Por ejemplo, es posible que un positrón al moverse en un gas se apodere de uno de los electrones de una molécula de gas y permanezca adherido a él. Este par positrón-electrón gira en torno a su centro de masas común, mantenido en equilibrio dinámico por una compensación entre su atracción electrostática y la fuerza centrífuga debida al movimiento giratorio, en términos clásicos. Se está tentado de denominar átomo a tal estructura, pues hay una gran analogía entre ella y el átomo de hidrógeno en el que un electrón y un protón casi dos mil veces más pesado que el positrón, giran en torno a su centro de masas común. A este pseudoátomo electrón-positrón se le conoce como «positronio».

Debe insistirse en que tal formación de estados ligados no es un fenómeno poco frecuente. Tiene un papel muy importante en el estudio de la aniquilación del positrón. Hay pruebas experimentales de que ordinariamente el 30% de todos los positrones lentos en un gas forman átomos de positronio antes de aniquilarse.

El positronio puede formarse en el estado de singlete o en el de triplete, según sean las orientaciones relativas de los ejes de los espines del electrón y del positrón. Con razonamientos estadísticos puede mostrarse que la formación en el estado de triplete es tres veces más probable que en la de singlete.

Aunque el positronio es una estructura estable en el sentido de que se necesita energía para separar sus partículas entre sí, tiene una vida media previsible, pues el positrón y el electrón acaban por aniquilarse mutuamente. La vida media en el estado de singlete es de $1{,}25 \times 10^{-10}$ s, con las duraciones de vida individuales según la distribución exponencial negativa ordinaria. La aniquilación en el estado de triplete, es menos probable, como ya se dijo, con un factor de 1/1120, lo que conduce a una vida media de unos $1{,}4 \times 10^{-7}$ s. Estos tiempos pueden parecer insignificantemente breves, pero en la escala atómica son bastante largos. Como se ve, la vida media del positronio en singlete es demasiado efímera para permitir realizar observaciones sobre más que muy pocas de sus propiedades, con las técnicas actuales; pero 10^{-7} s es suficiente intervalo para estudiar numerosos aspectos del comportamiento físico y químico del positronio en el estado de triplete.

El positronio tiene un sistema de estados excitados cuyas energías pueden calcularse del mismo modo exactamente que los del átomo de hidrógeno. En realidad, salvo diferencias de masa y de momento magnético entre protones y positrones, los niveles energéticos del positronio son similares a los del hidrógeno atómico, con todas las energías reducidas proporcionalmente por un factor que es casi exactamente 2. La energía de ionización, o sea la necesaria para separar el positrón y el electrón en el positronio sin excitar, es por tanto 6,8 eV: la mitad que en el caso del átomo de hidrógeno. Además, para cada línea del espectro óptico del hidrógeno hay una línea en correspondencia en el espectro del positronio, en la longitud de onda doble.

LA EXTINCION DEL POSITRONIO EN TRIPLETE

Desde que se forma, el átomo de positronio choca al azar con las moléculas del gas en el que se mueve, efectuando con frecuencia procesos químicos o cuasiquímicos. Por ejemplo, se ha mencionado la prueba de la existencia de compuestos químicos tales como los hidrácidos pero de positronio.

El efecto que se observa de ordinario como debido a las interacciones entre el positronio y las moléculas de gas es una reducción aparente en la vida media del positronio en estado de triplete causada por procesos que, en conjunto, se conocen como «colisiones de extinción».

Probablemente el mecanismo de extinción que ocurre más a menudo es aquél en el cual durante

un choque entre el átomo de positronio y una molécula de gas el positrón se aniquila directamente con uno de los electrones de la molécula, en la orientación de singlete. A primera vista parece sugerirnos que esto conduciría a un ritmo de aniquilación comparable con el experimentado por los positrones libres moviéndose en ese gas. Sin embargo, en el caso del positronio, el positrón está muy apantallado por el electrón, lo que causa una merma en el ritmo de aniquilación de casi un orden de magnitud. En los gases donde éste es el proceso principal, podría por tanto esperarse observar un grado de extinción moderadamente pequeño.

Se conocen dos grupos de gases que son agentes extintores notablemente intensos. El primer grupo, sobre todo los NO y NO_2, contiene un número impar de electrones en su molécula. El proceso responsable de la extinción en este caso se cree que sea que durante un choque se cambia el electrón del positronio en triplete por el electrón impar en la molécula, que podía estar en una orientación adecuada para producir un positronio en singlete. Este singlete se aniquilaría entonces rápidamente debido a su propia vida media característica de $1{,}25 \times 10^{-10}$ s.

El segundo grupo de gases con un gran poder de extinción, o sea los halógenos, se cree que originan compuestos químicos del tipo del cloruro de positronio, similar al ácido clorhídrico. En tal compuesto, en vez de ir libremente de molécula a molécula, el positronio está ligado para permanecer junto a los electrones del cloro, aumentando así mucho la probabilidad de una colisión aniquiladora.

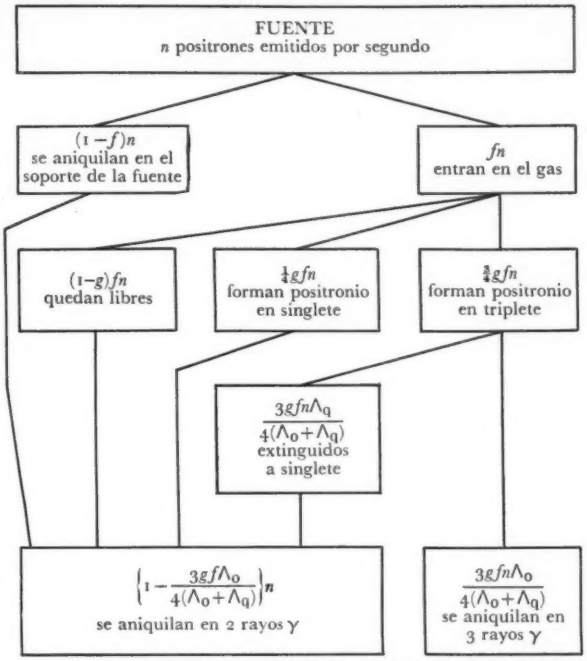


FIGURA 2 – *Destinos posibles de los positrones en un gas* [6].

EL DESTINO DE LOS POSITRONES EN UN GAS

Los positrones empleados para estudiar el positronio se obtienen generalmente poniendo una fuente radiactiva tal como el ^{22}Na que se desintegra emitiendo un positrón energético, en el gas de experimentación. Los positrones son frenados rápidamente por choques con las moléculas del gas hasta que se mueven suficientemente despacio para aniquilarse o para formar positronio. Este tiempo de frenado es relativamente corto (unos 10^{-9}s) en comparación con la vida media del positronio en estado de triplete y con la vida media de los positrones respecto a su aniquilación por choques libres con los electrones.

La Fig. 2 es un diagrama que resume las vías posibles que representan la historia de un positrón en un gas. El factor f representa la fracción de los positrones emitidos que logra salir de la fuente y penetrar en el gas sin aniquilarse con los electrones del material de la fuente o de su soporte. El factor g representa la fracción de los positrones que penetran en el gas y forman positronio.

La cantidad Λ_0 es la velocidad de aniquilación natural del positronio en el estado de triplete, o sea el recíproco de la vida media en ausencia de extinción; en tanto que Λ_q es la velocidad de extinción, esto es el recíproco de la vida media que tendría el positronio en triplete si la extinción fuera el único factor que causara su desaparición.

LA OBSERVACION DIRECTA DE LA DURACION DEL POSITRONIO EN UN GAS

Por una rara y afortunada casualidad, la substancia radiactiva comúnmente usada para estudiar el positronio emite un fotón gamma de 1,36 MeV de modo prácticamente simultáneo con la emisión del positrón, con lo que la detección de aquél proporciona un índice temporal adecuado para conocer el instante del nacimiento del positrón. El momento de la aniquilación puede observarse con exactitud detectando alguno de los rayos gamma de aniquilación. En la Fig. 3 se representa el esquema de una instalación típica

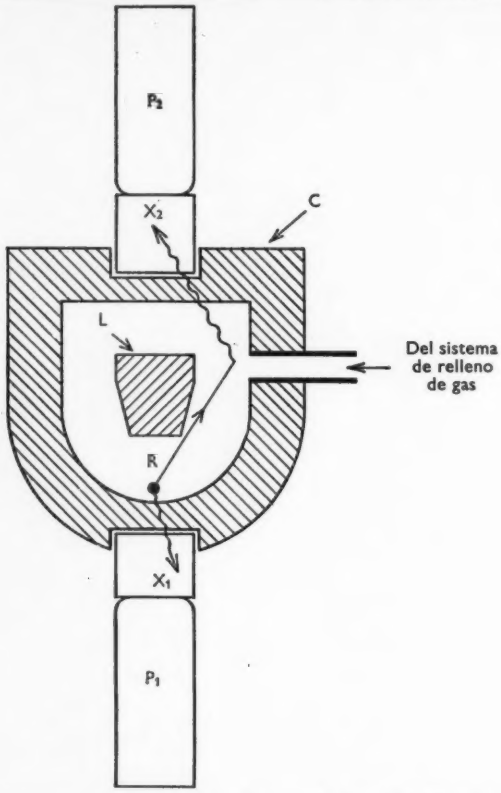


FIGURA 3 – *Aparato para observar la duración del positrón.*

usada para estas observaciones. R es la fuente radiactiva colocada dentro de un recipiente a gran presión C. Un cristal de centelleo X_1 detecta el paso de un fotón gamma de 1,36 MeV y fija así el instante de nacimiento de un positrón. Este cristal está unido ópticamente a un multiplicador de electrones secundarios P_1 que convierte el destello luminoso en un impulso eléctrico y lo amplifica. Un bloque de plomo L impide que llegue la radiación procedente de la fuente hasta el cristal X_2, el cual puede, no obstante, detectar la radiación producida por un positrón que se aniquile en el gas. Este cristal, junto con el multiplicador de electrones secundarios P_2, produce un impulso que define el momento de la aniquilación. Los intervalos entre cada impulso de «nacimiento» y «muerte» se miden y registran electrónicamente. Con circuitos electrónicos suficientemente rápidos es posible medir estos intervalos con una precisión de unos 10^{-9} s, esto es cerca del 1% de la vida media del positronio en triplete.

En experimentos de este tipo, los positrones que forman positronio en estado de singlete inmediatamente después de frenarse, se aniquilan tan rápidamente que debido al tiempo finito de resolución del aparato, sus duraciones de vida aparecen como coincidencias realmente inmediatas entre los detectores de nacimiento y de muerte. Sin embargo, los positrones que se aniquilan por colisiones libres con electrones y forman positronio en triplete tienen generalmente vidas largas mensurables, como indica la típica curva de coincidencias retrasadas de la Fig. 4. Esta curva puede, por ejemplo, ser resuelta en tres componentes, como se indica, de los cuales la componente exponencial lenta que aparece como una línea recta en coordenadas logarítmicas, contiene toda la información necesaria para determinar la vida media y, por tanto, su recíproca, la velocidad de aniquilación.

Las duraciones de vida procedentes de aniquilaciones libres pueden distinguirse experimentalmente de aquéllas debidas al positronio en triplete en virtud del hecho de que sus velocidades de aniquilación difieren en su respectiva dependencia con las presiones. En el caso de aniquilación libre, los positrones chocarán con electrones de las moléculas de gas en cuantía proporcional a la densidad electrónica media, o dicho de otro modo: la velocidad de aniquilación será entonces proporcional a la presión del gas. Ilustra estos hechos la Fig. 5 según resultados obtenidos por observaciones en oxígeno, agente tan intensamente extintor que incluso a presiones pequeñas el positronio en triplete tiene una vida tan corta que la única aportación significativa a la componente de vida larga, es la debida a la aniquilación de los positrones libres. La curva que representa la

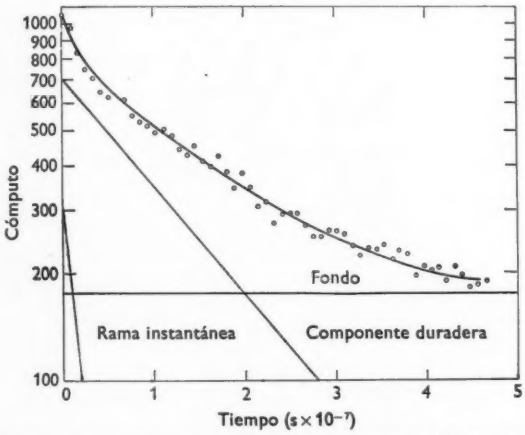


FIGURA 4 – *Curva de coincidencias retardadas en el freón* [4].

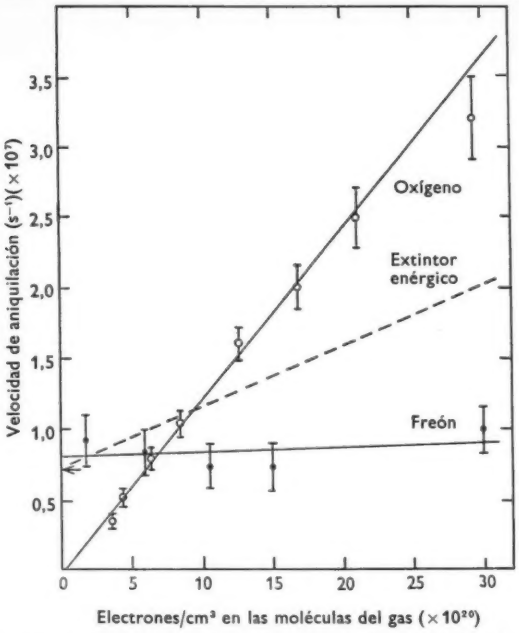


FIGURA 5 – *Dependencia de las velocidades de aniquilación respecto a las presiones en oxígeno y en freón* [3]. *La flecha indica la velocidad teórica para el triplete* [5].

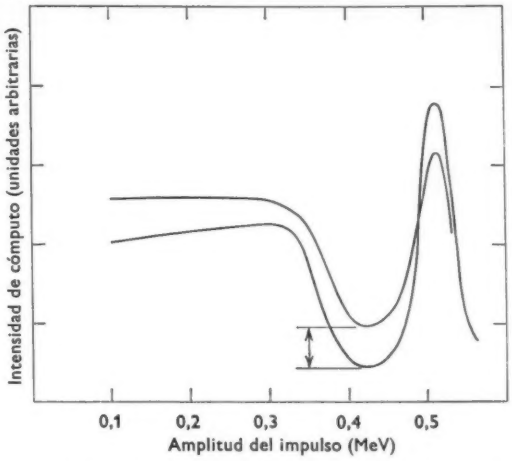


FIGURA 6 – *Espectros de amplitud de impulso en centelleos debidos a radiación de aniquilación.*

velocidad de aniquilación en función de la presión resulta ser una línea recta que pasa por el origen, correspondiendo a una proporcionalidad rigurosa.

En cambio, los gases del tipo del freón, representados por el Cl_2F_2C, tienen la notable propiedad de atrapar los positrones libres y hacer que se aniquilen rápidamente, dejando al positronio en triplete como única aportación a la componente de vida larga. Cuando no hay extinción, la vida media del positronio en triplete es una cantidad característica del átomo de positronio solamente, sin dependencia con la presión del gas. Este es realmente el caso del freón, como se indica en la Fig. 5.

En la práctica, la componente de vida larga ha de atribuirse de ordinario a una mezcla de aniquilaciones de positrones libres y de positronios en estado de triplete. La curva de la vida en estas circunstancias consistirá en una composición de dos exponenciales. Las dos componentes pueden ser observadas por separado añadiendo una pequeña cantidad de freón al gas del experimento para eliminar los positrones libres, o añadiendo una pizca de un agente extintor fuerte tal como el NO para eliminar el positronio en estado de triplete.

La curva de trazos en la Fig. 5 representa el efecto de un gas con intensa acción extintora. La variación de la duración de vida con la presión es tal que la velocidad de aniquilación está formada por dos componentes aditivas: una velocidad constante debida a la vida media natural, y una velocidad de extinción superpuesta, proporcional a la densidad de electrones.

LAS OBSERVACIONES EN EL ESPECTRO DE LA RADIACION GAMMA

Ya se ha mostrado (Fig. 1) que la radiación gamma de las aniquilaciones de tripletes tiene un espectro continuo de energía, mientras que el espectro de aniquilaciones de singletes está formado por una línea neta. Esta diferencia entre ambos espectros es usada para determinar en una muestra gaseosa la concentración eficaz de positronio en estado de triplete.

Cuando sobre un cristal de centelleo como el yoduro sódico incide un haz de rayos gamma monoenergéticos, como los producidos en las aniquilaciones de singletes, los impulsos eléctricos resultantes del multiplicador de electrones secundarios acoplado al cristal tienen la distribución de amplitudes que se representa en la curva (1) de la Fig. 6. El máximo relativamente agudo lo producen los rayos gamma que experimentan absorción fotoeléctrica en el fósforo y la amplitud del impulso luminoso es directamente proporcional a la energía del fotón gamma. La meseta larga a la izquierda se debe principalmente a los rayos gamma dispersados por efecto Compton, en los electrones, en cuyo caso se convierte en luz una parte variable y menor de la energía de los fotones

gamma. Debido a esta compleja respuesta de un espectrómetro de centelleo, incluso para un haz monoenergético de fotones gamma, no es utilizable, en general, para conseguir información detallada acerca de la distribución de energía de un espectro continuo de rayos gamma a partir de la distribución de amplitud de impulsos resultante. Sin embargo, si con tal aparato se exploran los rayos gamma producidos en una cámara donde tengan lugar aniquilaciones de singlete y de triplete, el espectro de amplitudes resultante se modifica en la manera que representa la curva (II) en la Fig. 6. El aumento en la altura del valle, marcada por las flechas, es una indicación sensible del número de aniquilaciones que originan tres cuantos.

Por tanto, puede efectuarse lo que es quizá la demostración más simple de la existencia del positronio en triplete, comparando la altura del valle obtenida mediante radiación de aniquilación en una cámara que contiene una fuente de positrones y un gas débilmente extintor, con la que se obtiene cuando se pone una pequeña cantidad de NO dentro de la cámara. En el último caso resulta fuertemente extinguido el estado de triplete, de modo que prácticamente todos los rayos gamma de aniquilación son de la forma de radiación de a dos cuantos simultáneos.

OTROS METODOS DE DETECCION

Los demás métodos importantes que se han empleado para identificar el origen de la radiación de aniquilación se sirven de que la multiplicidad y las distribuciones angulares de la radiación de tripletes son diferentes en la radiación de singletes.

Por ejemplo, dos detectores de centelleo que exploran una cámara desde lados opuestos darán impulsos de respuesta coincidentes en el caso de aniquilaciones de singlete. Esto se ha usado indirectamente para observar el positronio en triplete, estudiando la disminución en la intensidad de la radiación de dos cuantos cuando se alteran las condiciones en la cámara para que produzcan más aniquilaciones de las que originan tres cuantos simultáneos, como cuando se hacen observaciones sucesivas con y sin adiciones de NO al gas de la cámara.

La emisión de tres fotones gamma simultáneos en las aniquilaciones del estado de triplete se ha comprobado directamente colocando tres detectores de centelleo con sus centros en el mismo plano que el centro de la cámara que encierra el positronio, en posiciones tales que ningún par de cristales esté alineado con la cámara. Las coincidencias triples de impulsos en estos detectores indican, pues, la existencia de una aniquilación de triplete. Por este medio se ha comprobado que los fotones son emitidos en un mismo plano, puesto que disminuye la intensidad del cómputo si uno de los detectores se separa de la posición coplanar con los otros.

Algunos de los experimentos más refinados hechos sobre el positronio emplean más de una técnica de detección a la vez. Por ejemplo, se han hecho medidas de espectro en positronio exclusivamente triplete, en las que se analizaba la distribución de amplitudes de impulsos con uno de los detectores de centelleo de un sistema de tres, y se contaban únicamente los impulsos acompañados de coincidencias entre los otros dos detectores.

LA EXTINCION MAGNETICA

Cuando un átomo de positronio al estado de triplete está en un campo magnético, la interacción de éste con los momentos magnéticos del electrón y del positrón puede hacer que el eje de espín de una u otra partícula cambie de sentido durante parte del tiempo. A falta de otros efectos hay entonces una probabilidad determinada, según sea la intensidad del campo magnético, de encontrar positronio al estado de singlete en lo que inicialmente era una muestra de positronio en triplete. En términos de mecánica cuántica, la presencia de un campo magnético produce una mezcla entre las amplitudes del estado con impulso angular unidad y número cuántico magnético cero (una determinada fracción del positronio en triplete) y la del estado con impulso angular cero (positronio en singlete). Durante la fracción del tiempo en la que el átomo original en triplete se

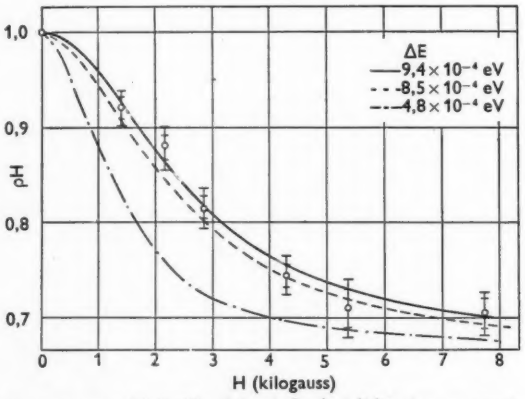


FIGURA 7 – *Extinción del estado de triplete por un campo magnético* [2]. *Las diversas curvas corresponden a distintas interpretaciones teóricas.*

comporta como un átomo en singlete, hay naturalmente, una probabilidad muy aumentada de que se aniquile rápidamente, lo que conduce en realidad a una vida media reducida para el estado en triplete. O dicho de otro modo, en un campo magnético el positronio en triplete puede aniquilarse en la forma de dos cuantos típica del estado en singlete, compensando el propio campo magnético cualquier diferencia en impulso angular exigida para cumplir las leyes de conservación.

Si una fuente de positrones se coloca en una muestra de gas, la concentración de positronio en triplete en aquél alcanzará un equilibrio dinámico cuando la velocidad de formación a partir de los positrones recién emitidos se compense con la velocidad de pérdida a causa de la aniquilación. Una disminución en la vida media conducirá entonces a una merma en la concentración. Este hecho se ha empleado para observar la extinción magnética, utilizando el método de la altura del valle para medir la intensidad del espectro de aniquilación del triplete. En la Fig. 7 se representa una curva característica que relaciona la velocidad de aniquilaciones de triplete con la intensidad del campo magnético. Los experimentos están en concordancia con las minuciosas previsiones teóricas.

LOS NIVELES DE ENERGIA Y EL ESPECTRO OPTICO

Si el positronio en triplete se formara en un estado excitado, habría una determinada probabilidad de emisión de una de sus líneas características en el espectro óptico si la vida media respecto a la desexcitación por emisión óptica fuera pequeña comparada con la vida media respecto a la aniquilación directa desde el estado excitado. En particular, éste es el caso de la línea que se corresponde con la línea alfa de Lyman en el espectro atómico del hidrógeno. En el espectro del positronio dicha línea tiene una longitud de onda de casi 2430 Å, y aunque es el doble que la correspondiente en el hidrógeno, está todavía en la zona ultravioleta, lo que hace algo complicada su detección. Además, las concentraciones de positronio que pueden obtenerse en la práctica son sumamente pequeñas si se comparan con las concentraciones usuales de los gases en los experimentos espectroscópicos, de modo que no puede esperarse detectar más de un fotón cada algunos segundos en un experimento típico de laboratorio. Pese al número de intentos hechos para hallar esta línea, todavía no se ha logrado

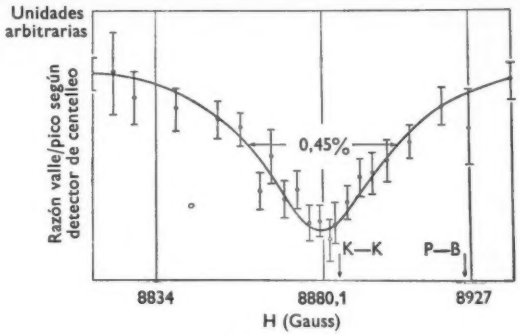


FIGURA 8 – *Extinción del nivel* m = ± 1 *mediante un campo de radiofrecuencia* [1]. P — B *es la posición prevista para el mínimo según la teoría electrodinámica hasta el primer orden.* K — K *es la posición que se prevé si se atiende a correcciones de orden superior.*

obtener un resultado exento por entero de ambigüedad.

Aunque aún no se ha observado ninguna línea en el espectro óptico del positronio, lo cierto es que se han observado experimentalmente ciertos detalles de estructura fina de las líneas debidas al efecto de Zeeman.

En un campo magnético, las líneas espectrales, en general, se dividen en componentes que se diferencian muy poco en longitud de onda. Esto se debe a que el campo magnético hace que diversos niveles energéticos del átomo se dividan en componentes que están muy próximos, de acuerdo con diferentes valores del número cuántico magnético. Si se someten los átomos a un campo electromagnético de radiofrecuencia superpuesto al campo magnético estático, es posible inducir transiciones entre estos subniveles cuando la frecuencia es la correspondiente a las diferencias de energía que intervienen.

Deutsch y Brown han observado este proceso en una serie de notables experimentos, con una cámara para positronio de la forma de una cavidad resonante generadora de microndas, colocada en un intenso campo magnético permanente, capaz de lograr prácticamente una extinción magnética total. Así, como ya hemos dicho, casi todo el positronio en triplete cuyo número cuántico magnético sea cero, quedará extinguido. Se aplica entonces a la cavidad un campo de radiofrecuencia, con lo que aumenta la extinción, para el valor del campo permanente que permite la exacta división de niveles para que el campo de radiofrecuencia induzca transiciones desde los subniveles con número cuántico magnético ± 1, hasta el subnivel de número cuántico magnético 0. Esta

extinción adicional se representa en la Fig. 8 en función del campo magnético.

La posición del mínimo en esta curva concuerda muy exactamente con el valor calculado mediante la electrodinámica cuántica cuando se consideran razonamientos teóricos sutiles.

Este es un experimento interesante por varios conceptos y puede equipararse al famoso de Lamb y Retherford de división del nivel fundamental del átomo de hidrógeno como uno de los pocos experimentos de precisión realizados para probar la exactitud de ciertos efectos abstrusos de orden superior en electrodinámica.

CONCLUSION

Aquí no ha sido posible más que indicar apenas algunas de las características más sobresalientes en el estudio del positronio. Sin embargo, creemos haber expuesto que el estudio detallado del destino del positrón en la materia se ha revelado como tema con numerosas facetas interesantes, más de las que cabría esperar al principio de la escueta teoría de Dirac sobre la aniquilación por choque central entre positrones y electrones, en cuanto puede formarse este complejo cuasi-atómico de naturaleza efímera conocido como positronio.

REFERENCIAS

[1] DEUTSCH, M. y BROWN, S. C. *Phys. Rev.*, **85**, 1047, 1952.
[2] DEUTSCH, M. y DULIT, E. *Ibid.*, **84**, 601, 1951.
[3] DEUTSCH, M., DULIT, E. y PRIMAKOFF. *M.I.T.-L.N.S.E. Prog. Rep.*, **131**, 31 de mayo, 1951.
[4] DUFF, B. G. Comunicación particular.
[5] ORE, A. y POWELL, J. L. *Phys. Rev.*, **75**, 1696, 1949.
[6] OSMON, P. E. Tesis, Universidad de Londres, 1960.

Revista de libros

FISICA

Theoretical Physics in the Twentieth Century. A memorial volume to Wolfgang Pauli. (Edición a cargo de M. Fierz y V. F. Weisskopf.) x+328 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960. 72s.

Esta colección de doce artículos, a la que se ha añadido una bibliografía de toda la obra por él publicada, iba a ser un homenaje a Pauli en celebración de sus sesenta años; la muerte del sabio, antes de haberse terminado la preparación del volumen, ha hecho de éste un homenaje póstumo. Lo que aparece bien claro en esos estudios de la física del siglo XX es que apenas hay un aspecto de ella en el que la labor de Pauli no haya sido decisiva, con excepción quizás de la estructura molecular. Lo que principalmente le interesaba era el estudio de los problemas fundamentales, terreno en el que son necesarios imaginación, valor y conocimientos técnicos: todo ello lo poseía Pauli. Y el resultado de sus trabajos son el Principio de Exclusión, el neutrino, las matrices del espín de Pauli, la formulación general de la electrodinámica cuántica, y otras muchas más cosas. Algunos capítulos históricos, especialmente los de Kronig y Van der Waerden contienen admirables estudios de temas de importancia capital y muestran, mucho mejor que toda una serie de trabajos más formalistas, la curiosa manera en que realmente progresan los descubrimientos científicos. La mayor parte de este libro es perfectamente comprensible para todo científico que posea conocimientos de ciencias físicas.

C. A. COULSON

LANDSBERG, P. T.: *Monographs in Statistical Physics and Thermodynamics*, Vol. II, *Thermodynamics*. x+499 págs. Interscience Publishers Inc., Nueva York y Londres. 1961. £5 9s.

Aunque este libro cumple indudablemente el propósito buscado, que es ser complemento de los textos ya existentes, y extiende además nuestros conocimientos de termodinámica, no es, sin embargo, adecuado para un principiante. La termodinámica es una ciencia demasiado útil para ser omitida aun en los cursos elementales, pero exije cuidadosa introducción. El tratamiento que en este libro recibe es, como reconoce el propio autor, poco convencional. En el primero de siete apéndices, el Professor Landsberg procura algunas de las características más singulares de su libro, incluyendo el uso de las particiones «diatérmicas» y «adiabáticas». En los seis apéndices restantes hay numerosas cuestiones — muchas interesantes y algunas importantes — así como en los problemas reunidos al final de cada capítulo. Para un lector avanzado, el libro contiene mucho material que conduce de manera novedosa a ciertos aspectos corrientes de la termodinámica, aunque el grado de originalidad del tratamiento no queda siempre justificado por la economía del método o la profundidad de los resultados obtenidos. El estudio de este libro por aquellos lectores bien versados ya en la termodinámica estadística presentada de manera más ordenada puede ser valioso y ampliar los conocimientos, sobre todo en la física teórica.

A. R. UBBELOHDE

DEAN, J. A.: *Flame Photometry*. VIII+341 págs. McGraw-Hill Book Co. Inc., Nueva York; McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., Londres. 1960. 89s.

Este libro forma parte de una serie de textos avanzados de química y está destinado principalmente a los utilizadores de la fotometría de llama como método analítico. Es muy recomendable para dicho propósito.

Son muy completos, tanto en número como en detalle, los datos compilados sobre los diversos elementos, lo que será de máximo valor para los lectores. Gran parte de la información contenida

es nueva; su presentación es sistemática y bien organizada. Son de particular interés las propias investigaciones del Profesor Dean sobre la extracción de los disolventes orgánicos de los metales con anterioridad a la estimación por fotometría de llama, y sobre el aumento de sensibilidad obtenida con disolventes orgánicos en la llama. El aumento de sensibilidad se cree resulta del aumento del tamaño de la llama, lo que parece indicar que el monocromator no se ha llenado adecuadamente; no se indica, sin embargo, un remedio apropiado.

Pueden hacerse algunas críticas, principalmente en los capítulos dedicados a la instrumentación. Los efectos atribuidos a la magnitud del ancho de la mirilla son algo vagos; en una tabla, ilustrativa del porcentaje de incremento del fondo de la llama al aumentar la anchura de la mirilla parece indicarse precisamente lo contrario. Hay otras anomalías que desfavorecen estas secciones del libro; sin embargo, no son graves inconvenientes para el lector general, que hallará esta obra de valor e interés.

R. L. WARREN

QUIMICA

BIRD, R. B., STEWART, W. E. y LIGHTFOOT, E. N.: *Transport Phenomena*. XXI + 780 págs. John Wiley and Sons Inc., Nueva York y Londres. 1960. £5 10s.

Este libro se basa en notas facilitadas a los estudiantes del curso de ingeniería química de la Universidad de Wisconsin. Trata del transporte del momento, energía y masa (esto es: materia) en los fluidos. Las analogías entre esos procesos, tanto en un sentido formal como físico, se señalan dentro de lo posible, aunque, naturalmente, no existe analogía en el caso del transporte de energía radiativa, que también se incluye.

El tema está tratado lógica y rigurosamente y, en ese sentido, este libro se encuentra muy por encima de la mayoría de los textos de ingeniería química. No es de lectura fácil ni de enfoque convencional y, a nuestro juicio, exije una serie de explicaciones interpretativas para que los estudiantes puedan seguirlo provechosamente.

P. V. DANCKWERTS

VANCINI, C. A.: *La Sintesi dell'Ammoniaca*. XXVII + 1075 págs. Editore Ulrico Hoepli, Milán. 1961. 12 000 liras.

La producción total mundial de compuestos de nitrógeno, derivados principalmente del amoniaco sintético, excede en la actualidad de doce millones de toneladas anuales de equivalente en nitrógeno, cifra que aumenta rápidamente. Desde que el amoniaco se sintetizó comercialmente se han introducido no pocas variaciones en las plantas de sintetización; hoy se encuentran en uso una gran variedad de procesos de producción y purificación de las enormes cantidades de hidrógeno que se necesitan. En este libro se describen los fundamentos técnicos y científicos de tales procesos de manera muy completa. Se incluyen los nuevos procesos para la producción de hidrógeno, tales como la reformación por vapor del metano y la oxidación parcial bajo presión, así como los antiguos métodos basados en el coque, en los gases de hornos de coque y la electrólisis acuosa. Los procesos de purificación recientemente desarrollados, tales como la extracción del CO_2 con soluciones calientes de carbonato potásico, también se mencionan, con la sorprendente excepción del proceso italiano denominado «Vetrocoke». Los procesos a bajas temperaturas para la producción de oxígeno, nitrógeno y mezclas de ambos se incluyen asimismo. También se mencionan ampliamente los diseños de los recipientes de presión y de los aparatos de sintetización. Este libro ha de ser de gran utilidad para los encargados y montadores de las plantas de fabricación de amoniaco y para todas los que se ocupen de los procesos de producción de hidrógeno en gran escala.

T. J. P. PEARCE

Organic Electronic Spectral Data. Vol. I (1946–52), compilado por M. J. Kamlet. XIV + 1208 págs. Vol. II (1953–55), compilado por H. E. Ungnade. X + 919 págs. Vol. I: £10 15s., Vol. II: £6 12s. Interscience Publishers Inc., Nueva York; Interscience Publishers Ltd., Londres. 1960.

En años recientes se han estudiado extensamente los espectros visible e ultravioleta de las substancias orgánicas. La interpretación teórica de los espectros y, en especial, la correlación empírica de los mismos con la estructura molecular son de gran valor en la química orgánica. El volumen de espectros publicados ha aumentado considerablemente debido a la más intensa y exacta utilización de los espectrofotómetros fotoélectricos; para hacer frente a tal situación un grupo de más de cincuenta químicos ha iniciado la compilación de los espectros de que hoy se dispone.

Los volúmenes I y II de esta publicación recojen los años 1946–52 y 1953–55, enorme tarea por la que es justo felicitar a los compiladores y sus colaboradores. En esos dos volúmenes se encierra gran cantidad de datos que han de ser de gran valor para todos los químicos orgánicos.

Los compuestos están ordenados de modo que sus fórmulas moleculares correspondan a las de *Chemical Abstracts*. Las tablas dan el nombre del compuesto, el disolvente utilizado, las longitudes de onda de máxima absorción, el coeficiente de extinción de cada banda y una referencia a la publicación original.

R. E. RICHARDS

Ciba Foundation Symposium on Quinones in Electron Transport. Edición preparada por G. E. W. Wolstenholme y C. M. O'Connor. XII + 453 págs. J. &. A. Churchill Ltd., Londres. 1961. 60s.

El descubrimiento por el Profesor R. A. Morton y sus colaboradores de la Universidad de Liverpool, e independientemente por el grupo del Profesor D. E. Green en la Universidad de Wisconsin, de los compuestos de la serie ubiquinónica (coenzima Q) ha aportado nuevo estímulo al estudio de la función de los lípidos en el transporte electrónico y en los procesos asociados de fosforilación en las mitocondrias. Los iniciadores y organizadores de este Simposio, que se celebró en 1960, han realizado la útil labor de facilitar los medios para que se reunieran los representantes de numerosos grupos de investigación y discutieran los descubrimientos iniciales y estudiaran la elucidación de las estructuras químicas y presentaran las distintas direcciones de trabajo que hoy se siguen.

Aparte de las autoritativas contribuciones relacionadas directamente con el título del simposio, entre otros aspectos del tema a los que se prestó atención se encuentran: mecanismos químicos de fosforilación oxidativa *in vitro*; posibles funciones de las quinonas (incluyendo la vitamina K) y de los derivados crománicos con ellas relacionados en la fosforilación; significado de la plastoquinona (quinona de Kofler) en el transporte electrónico de fotosíntesis y la fosforilación; biosíntesis de las porciones poliisoprenoide y quinoide de las ubiquinonas; valoración crítica de las técnicas empleadas en estas investigaciones.

La amplitud del Simposio muestra la atracción que este campo ejerce sobre gran diversidad de especialistas, por

ello este libro ha de ser de interés para un círculo muy extenso de lectores.

M. B. THORN

BIOQUIMICA

Metabolic Pathways, Vol. I (compilado por D. M. Greenberg) (segunda edición de *Chemical Pathways of Metabolism*). XV + 572 págs. Academic Press Inc., Nueva York; Academic Press Inc. (London) Ltd., Londres. 1960. £6 1s. 6d.

Este libro ha de ser de gran interés a todo lector — y debe haber muchos — que desee utilizar una obra de consulta plenamente documentada en la que se recojan todos los conocimientos actuales sobre las rutas metabólicas en animales, plantas y microorganismos. Esta segunda edición es virtualmente una nueva redacción de la primera, ya que de los 14 colaboradores en el volumen I sólo cuatro se contaban entre los de la primera edición. En los siete años transcurridos desde su publicación ha aumentado con gran rápidez nuestro conocimiento del metabolismo intermediario, llenándose numerosas lagunas y descubriéndose numerosas e inesperadas secuencias metabólicas. Los temas estudiados incluyen: energía libre y entropía en el metabolismo (A. B. Pardee y L. L. Ingraham), sistema mitocondrial enzimático (D. E. Green y S. Fleischer), glicolisis (B. Axelrod), ciclo del ácido tricarboxílico (H. A. Krebs y J. M. Lowenstein), otras rutas del metabolismo de los hidratos de carbono (B. Axelrod), metabolismo de las hormonas esteroides (L. T. Samuels) y carotenoides y vitamina A (G. Mackinney).

H. A. KREBS

GILMOUR, D.: *The Biochemistry of Insects*. XII + 343 págs. Academic Press Inc., Nueva York; Academic Books Ltd., Londres. 1961. 64s.

El autor se propone describir los procesos químicos que se producen en los insectos en tanto que organismos, más bien que estudiar las reacciones mismas, y ha conseguido su propósito relacionando los diversos procesos bioquímicos a las peculiaridades de la fisiología y biología entomológicas. El resultado es una obra muy interesante.

Más de la mitad del libro se dedica a los diversos aspectos de la producción energética y en esos capítulos vemos claramente que la mayoría de los procesos son similares a los de otros animales, pero con importantes diferencias de detalle, como sucede en la glicolisis y en la cadena respiratoria. El resto del libro trata principalmente del metabolismo intermediario de los hidratos de carbono, lípidos y compuestos nitrogénicos, e incluye estudios de los componentes de la cutícula de los insectos y de las teorías del curtido de cutículas.

El libro, en su conjunto, ofrece un estudio crítico y muy útil de la bioquímica entomológica. A. N. CLEMENTS

BOTANICA

HAGERUP, O. y PETERSON, V.: *Botanisk Atlas*, Vol. II (traducción inglesa de H. Gilbert Carter). 299 págs. Ejnar Munksgaard, Copenhague. 1960. 76 Dkr.

Este volumen sirve de complemento al primero, obra de los mismos autores, que fue reseñado en ENDEAVOUR en 1957. Trata de las coníferas y criptógamas vasculares, y sigue el mismo plan — y tiene los mismos méritos — que el anterior. Aparecen ilustradas casi la mitad de las especies dinamarquesas de musgos y hepáticas y todas las de licópodos, belchos y coníferas. Como en el volumen anterior, hay dibujos de hábito (los árboles aparecen representados sólo por pequeñas ramas) generalmente a base de material fresco, con dibujos agrandados de detalle cuando se necesita. Hay más texto que en el primer volumen y consiste principalmente de la descripción de cada uno de los grupos ilustrados; está en dinamarqués y en inglés, en columnas paralelas. Finalmente hay una sección teórica filogenética que se refiere especialmente al origen del hábito seminal, lo que parece distanciarse algo del carácter concreto de la mayor parte de la obra. W. O. JAMES

ZOOLOGIA

Traité de Zoologie, edición dirigida por P.-P. GRASSÉ. Vol. V, Parte 2: *Bryozaires, Brachiopodes, Chétognathes, Pogonophores, Mollusques*. 1168 págs. Masson et Cie., París. 1960. Encuadernado, NFrs. 190; en rústica, NFrs. 180.

Este volumen, segundo de una serie de tres que tratan de los invertebrados entre los platihelmintos y los nematodos, por un lado, y los artrópodos, por otro, mantiene el muy elevado nivel de este magnífico tratado.

Los briozoarios están plenamente tratados en un capítulo de casi 300 páginas, obra de Paul Brien, seguido de un estudio de sus representantes fósiles por Emil Buge. A continuación hay capítulos sobre los braquípodos recientes y fósiles, por Paul de Beauchamp y Jean Roger respectivamente, en los que aparecen bien resumidos los trabajos recientes sobre las corrientes nutricias y la embriología y bien descritas la estructura, clasificación e historia evolutiva del grupo. La sección sobre los quetognados, también de Paul de Beauchamp, nos parece algo breve debido a la gran importancia ecológica de dichos seres en el planctón de todos los mares.

El capítulo de más de 100 páginas sobre el grupo recientemente establecido de los pogonóforos tiene especial valor. Es obra de A. V. Ivanov, de la Universidad de Leningrado, autoridad reconocida en esos animales.

El resto del volumen — unas 500 páginas — trata de los moluscos, con excepción de gastrópodos, escafópodos y cefalópodos, que serán estudiados en el volumen III. A. Portman trata de los caracteres generales del fílum y pudiera criticarse su omisión de las diferentes simetrías del cuerpo y del manto, que son la clave de la comprensión de las grandes diferencias de forma en los moluscos. E. Fischer-Piette y A. Franc tratan muy satisfactoriamente de aplacóforos y poliplacóforos; los monoplacóforos están estudiados por H. Lemche y K. G. Wingstraad. P. Manigault trata brevemente de la concha y A. Franc estudia la gran clase de los bivalvos. C. M. YONGE

TECNOLOGIA

RYSHKEWITCH, E.: *Oxide Ceramics, Physical Chemistry and Technology*. VIII + 472 págs. Academic Press Inc., Nueva York; Academic Press Inc. (London) Ltd., Londres. 1960. $16.

Las informaciones contenidas en este libro hubieran podido presentarse mucho más claramente en la mitad del número de páginas. El autor no escribe en su propio idioma, pues el libro se basa en su *Oxydkeramik der Einstoffsysteme* publicado en 1948. Las primeras 68 páginas son una introducción general; luego siguen capítulos sobre la alúmina (150 páginas), espinela (23 páginas), magnesia, berilia, circonia, toria y ceria, y una breve sección sobre las cerámicas óxido-metal y óxido-carburo. El libro parece escrito primordialmente para los lectores a quienes interese la manufactura de artículos de cerámica-óxido; en tanto que fuente de datos y guía bibliográfica será muy útil. Contiene consejos interesantes sobre la preparación de tales cerámicas. R. W. DOUGLAS

Revistas resumidas de libros

(Estas revistas tienen carácter descriptivo más bien que crítico y sirven para dar una indicación general del contenido y naturaleza de las obras tratadas.)

POWELL, J. L. y CRASEMANN, B.: *Quantum Mechanics*. x+495 págs. Addison-Wesley Publishing Co., Inc. Reading, Mass. 1961. 74s.

Se trata de una introducción a la mecánica cuántica para uso de estudiantes universitarios avanzados. Procura subrayar los fundamentos físicos de la materia, sin ignorar su aspecto matemático. Entre otros, hay capítulos sobre los orígenes de la teoría, la ecuación de Schrödinger, los operadores y las eigenfunciones, la mecánica de matrices, la teoría de las perturbaciones y las partículas idénticas.

Progress in Low Temperature Physics, Vol. III (edición dirigida por C. J. Gorter). XII + 495 págs. North-Holland Publishing Co., Amsterdam. 1961.

Este volumen, como los dos primeros, contiene una colección de artículos generales destinados a los investigadores. Algunos capítulos son: líneas de vórtice en helio líquido II, por W. F. Vinen; naturaleza de la transición-λ en el helio líquido, por M. J. Buckingham y W. M. Fairbank; recientes progresos en superconductividad, por K. W. Taconis; algunos equilibrios sólido-gas a bajas temperaturas, por Z. Dokoupil.

WHITE, J. H.: *A Reference Book of Chemistry*. 302 págs. University of London Press Ltd., Londres. 1960. 21s.

Este libro se propone servir de suplemento a los textos usados en los últimos años de la enseñanza media. Sus secciones incluyen: definiciones y explicaciones de términos importantes, reactivos y pruebas orgánicas, reactivos inorgánicos y reacciones orgánicos con nombre propio.

HAMILL, W. H. y WILLIAMS, R. R.: *Principles of Physical Chemistry*. x+607 págs. Oliver and Boyd Ltd., Edimburgo. 1960. 30s.

El tratamiento usado en este libro consiste en desarrollar previamente la termodinámica y luego la física química. Está destinado a ser usado en universidades y trata del conjunto de la química física fundamental, con otros capítulos que, entre otras cosas, estudian la primera ley de la termodinámica, el equilibrio químico en los sistemas gaseosos, la entropía y la tercera ley de la termodinámica, los diagramas de fase, la química nuclear y la fotoquímica y la química de las radiaciones.

GRADDON, D. P.: *An Introduction to Coordination Chemistry*. VII+111 págs. Pergamon Press Ltd., Oxford. 1961. 25s.

Este libro cubre los progresos realizados en los últimos 20 años e incluye además un breve capítulo sobre los primeros desarrollos de la química de coordinación. También hay capítulos sobre la polimerización y la saturación coordenada, la estabilidad de las sales complejas y los carbonilos y complejos-π. El libro está destinado principalmente a los estudiantes.

Handbuch der Papierchromatographie, Vol. II, *Bibliographie und Anwendungen* (edición preparada por I. M. Hais y K. Macek). XXIV+726 págs. Gustav Fischer Verlag, Jena. 1960. DM 44.

Este segundo volumen de un extenso tratado de cromatografía en papel contiene una bibliografía clasificada muy completa con 10 290 entradas, referente sobre todo al período 1943–56. La primera parte cubre la historia, estudios y libros generales, la teoría y las técnicas cromatográficas y la preparación cromatográfica; después, en una parte especial hay secciones sobre la cromatografía de grupos de compuestos, por ejemplo los fenoles y substancias afines, ácidos orgánicos y esteroides. Estas secciones se subdividen en otras referentes a las técnicas y aplicaciones y van precedidas de breves párrafos introductorios.

Modern Chemical Processes, Vol. VI, por los encargados de la edición de «*Industrial and Engineering Chemistry*». 126 págs. Reinhold Publishing Corporation, Nueva York; Chapman and Hall Ltd., Londres. 1961. 48s.

Esta serie se propone describir los procesos de la tecnología química norteamericana en cuanto a sus principios, plantas, factores económicos y porvenir. Algunas técnicas descritas en este volumen son: manufactura de productos básicos de silicona; uso de los reactivos de Grignard, manufactura de agentes especializados de activación superficial; y manufactura de acrilatos y metacrilatos.

WALKER, E. H.: *A Bibliography of Eastern Asiatic Botany*. XL+552 págs. American Institute of Biological Sciences, Wáshington D.C. 1960. $18,50 para particulares y bibliotecas industriales; $16,50 para miembros del AIBS y las demás bibliotecas.

La bibliografía original compilada por E. D. Merrill y E. H. Walker, apareció en 1938 y recogía la literatura hasta 1936. El presente volumen extiende la bibliografía hasta fines de 1958 y está presentado de la misma manera que el anterior. El autor explica que las publicaciones japonesas, y aún más las chinas, no están todas recogidas debido a la destrucción durante la guerra de algunas bibliotecas en Tokío y a la escasa circulación de las publicaciones chinas durante el período de guerra.

Non-convertible Coatings, por The Oil and Colours Chemists Association. 326 págs. Chapman and Hall Ltd., Londres. 1961. 30s.

El propósito principal de este libro es ayudar a los estudiantes que se preparan para el examen de los Gremios Municipales sobre tecnología de la pintura, aunque es de esperar que sea también útil a todos los que trabajan en la industria de la pintura. Tiene capítulos sobre la nitrocelulosa, los plastificantes, el acetato celulósico, las resinas-lacas termoplásticas sintéticas y los barnices al alcohol.

MCKENZIE, A. E. E.: *The Major Achievements of Science*, Vol. I. XVI+368 págs; Vol. II, XII+195 págs. Cambridge University Press. 1960. Vol. I, 30s. (edición escolar: 20s.); Vol. II, 17s. 6d. (edición escolar, 12s. 6d.).

El autor de este libro se propone describir la historia y elementos generales de los progresos científicos para los estudiantes de humanidades. Así hay capítulos sobre «La circulación de la sangre», «La física aplicada» y «La teoría microbiana de las enfermedades», así como sobre el desarrollo histórico de la ciencia en los siglos XVI, XVII, XVIII, XIX y XX. Se subrayan las tendencias generales del pensamiento científico y la personalidad de los hombres de ciencia.

Notas sobre los colaboradores

A. F. WAGNER

Nació en Jersey City, Nueva Jersey, en 1922 y estudió en las universidades de Nueva York y Princeton, donde recibió un grado de doctor en 1951. Ingresó en el personal de investigación de Merck & Co. Inc. después de terminar sus estudios universitarios. Se interesa principalmente en los procesos de síntesis y en la relación entre estructura y actividad de los productos naturales, habiendo participado en la primera sintetización efectiva del ácido mevalónico.

K. FOLKERS

Nació en Decatur, Illinois, en 1906 y estudió en la Universidad de Illinois y en la de Wisconsin, donde recibió el grado de doctor en 1931. De 1931 a 1934 fue miembro de investigación posdoctoral en la Universidad de Yale, bajo el Prof. Treat B. Johnson. En 1934 ingresó en Merck & Co. Inc.; desde 1956 es Director Ejecutivo de Investigaciones Fundamentales. Se ha interesado particularmente en la química de los agentes terapéuticos, tales como los alcaloides, la vitamina B6 y el ácido pantoténico; sus trabajos más recientes han resultado en el descubrimiento del ácido mevalónico, habiendo realizado asimismo investigaciones sobre el grupo de coenzimas Q. Es ganador de la Medalla Perkin de la *Society of Chemical Industry* y Presidente-elegido de la *American Chemical Society*.

SIR EDWARD BULLARD

Nació en 1907 y estudió en el *Clare College* de Cambridge. Inició sus investigaciones bajo Lord Rutherford en 1929 sobre la dispersión de electrones lentos en los gases. En 1931 comenzó sus trabajos en geofísica y ha realizado labores experimentales sobre la gravedad, la sismología y la medida de los flujos térmicos en mares y continentes. Desde 1950 a 1955 fue Director del *National Physical Laboratory* y en la actualidad es Profesor de Geofísica en la Universidad de Cambridge. Ha escrito numerosos trabajos sobre el origen del campo magnético de la Tierra y sobre magneto-hidrodinámica.

M. H. PIRENNE

Nació en Verviers, Bélgica, en 1912 y estudió en la Universidad de Lieja. Desde 1942 a 1945 trabajó sobre la visión en el laboratorio de Sir F. C. Bartlett en Cambridge. De 1945 a 1948 aprovechó una bolsa de estudios de I.C.I. para realizar investigaciones en la Universidad de Londres, y desde 1948 a 1955 fue Profesor de Fisiología en la Universidad de Aberdeen. A partir de dicha fecha ha pertenecido a la Universidad de Oxford, donde en la actualidad es Demostrador de Fisiología. En 1957 fue elegido Vicepresidente del *Comité International de Photobiologie*. Sus investigaciones se centran principalmente en la fisiología de la visión y temas afines.

V. A. EYLES

Nació en Bristol en 1895 y estudió en la Universidad de Bristol. En 1920 fue nombrado experto geólogo en la rama escocesa del departamento de topografía de la Gran Bretaña y transferido luego en 1945 como Geólogo de Distrito a la rama inglesa, puesto que conservó hasta su jubilación en 1955. Es miembro fundador de la *British Society for the History of Science* y miembro de la *History of Science Society* (*U.S.A.*). Ha publicado trabajos sobre la historia de la geología en numerosas revistas y dictado cursos sobre dicho tema en el Departamento de Historia y Filosofía de la Ciencia de la Universidad de Londres desde 1951 a 1956, así como en las universidades de California e Illinois.

H. SJÖRS

Nació en Suecia en 1915 y estudió en la Universidad de Upsala, donde llegó a ser profesor de ecología vegetal en 1948. Más tarde pasó tres años en la Universidad de Lund, y desde 1955 es *Laborator* en botánica forestal en la Escuela Forestal de Estocolmo. Sus principales trabajos se han referido a la ecología de pantanos y marjales. También ha publicado trabajos sobre la fitogeografía de Escandinavia, sobre los suelos de humus y sobre las forestas septentrionales condicionadas por antiguos procedimientos de cultivo rural, estando además activamente interesado en la conservación de los recursos naturales.

F. F. HEYMANN

Nació en Sudáfrica en 1924 y estudió en la Universidad de Capetown desde 1940 a 1945. Perteneció al personal de dicha Universidad hasta 1947, año en que se trasladó a Inglaterra e ingresó en la firma *Metropolitan-Vickers* como investigador de física industrial. Desde 1950 pertenece al personal docente de la Universidad de Londres, donde es Profesor de Física. Ha publicado numerosos trabajos sobre los aceleradores de partículas y la física nuclear de altas energías; durante los tres años últimos se ha ocupado en investigaciones sobre el positronio.